PAUL DAVIES

EL UNIVERSO ACCIDENTAL

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

PAUL DAVIES

EL UNIVERSO ACCIDENTAL

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

Versión española de la obra original *The Accidental Universe* publicada por Cambridge University Press de Cambridge.

Edición digital: Sargont (2017)

ISBN 0–521–28692–1 Edición original
ISBN 84–345–8246–5 Obra completa
ISBN 84–345–8404–2
Depósito Legal NA–928–86
Publicada por Salvat Editores, S. A. – Mallorca, 41–49 – Barcelona
Impresa por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

Prefacio

A pesar del progreso espectacular de la física en los últimos años, en lo que respecta a la comprensión de las fuerzas básicas de la naturaleza, muchas características fundamentales del mundo físico parecen arbitrarias y carentes de sentido. ¿Por qué hay tres dimensiones espaciales? ¿Por qué es tan débil la gravedad? ¿Por qué el protón es 1.836 veces más pesado que el electrón? Y así sucesivamente.

Los valores numéricos que la naturaleza ha asignado a las constantes fundamentales, como la carga del electrón, la masa del protón y la constante gravitatoria de Newton, constituyen un enigma, pero tienen una importancia capital en la estructura del Universo que percibimos. A medida que los científicos han ido comprendiendo mejor un número cada vez mayor de sistemas físicos, desde núcleos a galaxias, se han ido percatando de que estos sistemas son extraordinariamente sensibles a los valores precisos de las constantes fundamentales. Si la naturaleza hubiera elegido un conjunto de números ligeramente diferentes, el mundo sería muy distinto. Probablemente no estaríamos aquí para contemplarlo.

Y lo que es aún más sorprendente, algunas estructuras fundamentales, como las estrellas de tipo solar, dependen, en lo que a sus rasgos más característicos se refiere, de accidentes numéricos extraordinariamente improbables que combinan constantes fundamentales de diferentes áreas de la física. Y cuando abordamos el estudio de la cosmología —la estructura y evolución del Universo como un todo— crece nuestro asombro. Los descubrimientos más recientes sobre el Cosmos primitivo nos obligan a aceptar el hecho de que el Universo en expansión se puso en marcha con el concurso de una precisión asombrosa.

Hace ya varias décadas que se conocen muchos de estos “accidentes de la naturaleza”. En los años treinta, Eddington y Dirac se

sorprendieron ante la curiosa e inesperada coincidencia de algunos números muy grandes que surgían en la física atómica y en la cosmología, áreas aparentemente sin relación. Éstos y otros ejemplos nos hacen pensar que el Universo presenta un equilibrio multiforme extraordinariamente preciso.

El único intento sistemático (si excluimos la religión) de explicar la extraordinaria complejidad del mundo físico, procede de una desviación radical del pensamiento científico tradicional. La idea en cuestión, el llamado *principio antrópico*, consiste en relacionar las características básicas del mundo con nuestra existencia en tanto que observadores. El principio se remonta a grandes físicos tales como Boltzmann, *y* en los últimos años un buen número de eminentes científicos, como Brandon Carter, Robert Dicke, Freeman Dyson, Stephen Hawking, Martin Rees y John Wheeler, lo han vuelto a proponer. Algunos de estos científicos llegan a afirmar que nuestra existencia puede utilizarse como un efecto de selección biológico capaz de dar razón de los misteriosos valores numéricos de las constantes físicas fundamentales.

Si bien algunos autores consideran inaceptables las bases filosóficas del principio antrópico, es difícil evitar el asombro ante alguno de los accidentes aparentemente fortuitos sin los cuales nuestra existencia no habría sido posible. En este libro examinaremos algunos de estos accidentes y coincidencias numéricas; solamente en el último capítulo introduciremos el principio antrópico.

El libro está dirigido al lector medio, no especializado, y será de interés tanto para los científicos profesionales como para aquellos lectores con inclinaciones científicas. Los estudiantes de filosofía y de ciencias no tendrán dificultad en seguir el desarrollo del texto en su mayor parte, para lo cual solamente se requieren unos conocimientos generales de física básica. En el capítulo 1 se resume la mayor parte de la física necesaria en capítulos posteriores. El nivel corresponde aproximadamente al de *Scientific American* o de *New*

Scientist. Las matemáticas usadas no van más allá del álgebra elemental.

El tratamiento del material presentado sigue en gran parte las líneas generales de algunos excelentes estudios técnicos ya publicados.

Estoy en deuda muy en especial con el doctor Bernard Carr y el profesor Martin Rees, en cuyo artículo conjunto sobre el principio antrópico he basado gran parte de este libro. De ellos he recibido muchas sugerencias y comentarios de gran ayuda, así como de los doctores John Barrow, Frank Tipler y John Leslie. También han sido de gran utilidad varias fructíferas discusiones con miembros de los departamentos de Física y de Filosofía de la Universidad de Canterbury en Nueva Zelanda.

PAUL DAVIES

Índice de capítulos

NOTA SOBRE UNIDADES Y NOMENCLATURA

Las relaciones matemáticas de mayor interés en este libro no son ecuaciones exactas, sino desigualdades o igualdades aproximadas. Se utiliza muy a menudo el símbolo que significa que dos cantidades son aproximadamente iguales dentro de un orden de magnitud. Por ejemplo, $7\times10^8 \sim 5\times10^9$. Cuando se utiliza delante de una cantidad aislada, quiere decir "del orden de": por ejemplo $\sim10^3$ representa cualquier número, como 630 o 2.018, que es del mismo orden de magnitud que 10^3. Los símbolos $>$ y $<$ significan "mayor que" y "menor que", como es habitual, mientras que $\gtrsim$ quiere decir "mayor que aproximadamente" un cierto número, con el correspondiente significado para $\lesssim$.

En ocasiones se utiliza el símbolo $\simeq$. Este signo corresponde a la igualdad aproximada y se aplica cuando dos cantidades son iguales salvo un factor de a lo sumo 2. Así $\pi^2 \simeq 10$. Finalmente $\equiv$ se utiliza con el significado de "definido por": por ejemplo $\alpha \equiv e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c$ quiere decir que a es el símbolo utilizado para abreviar la cantidad $e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c$. Los lectores que deseen rehacer los cálculos con mayor precisión encontrarán una tabla de valores numéricos de las constantes fundamentales en la **tabla 3**, y otros datos de utilidad en la **tabla 5**.

En el texto se utilizan unidades SI (Sistema Internacional). Dado que el convenio SI para la carga eléctrica en el vacío requiere que e^2 venga acompañado por $(4\pi\varepsilon_0)^{-1}$ donde ε_0 es la permitividad (constante dieléctrica) del vacío, los factores 4π correspondientes se mantienen explícitamente en todas las expresiones, incluso cuando otros factores numéricos y potencias de π hayan sido eliminados como parte de la aproximación $\sim$. Además, si bien el símbolo ε_0 es convencional, dado que no tendremos ocasión de considerar medios dieléctricos, suprimiremos sistemáticamente el subíndice 0 y escribiremos ε en vez de ε_0.

1. Los ingredientes fundamentales de la naturaleza

La variedad y complejidad de los sistemas físicos que pueblan nuestro Universo es tan desconcertante que la tarea de descubrir leyes simples que los describan a todos ellos parece imposible. Sin embargo, y por extraordinario que parezca, conocemos suficientemente los principios fundamentales que controlan objetos tan diversos como los átomos y las estrellas para dar una explicación conjunta de los sistemas más comunes del mundo natural. Nuestra capacidad de integrar el funcionamiento de la naturaleza en un único marco teórico proviene del hecho de que las características realmente fundamentales de la física son sencillas y de validez muy amplia. La mecánica cuántica, por ejemplo, tiene un poder predictivo tan enorme que le permite explicar al mismo tiempo fenómenos tan dispares como la formación de un cristal y el colapso de una estrella de neutrones.

La universalidad de la física fundamental está en la base de todo cuanto veremos en los próximos capítulos. El lector descubrirá que, si bien los detalles específicos de los sistemas físicos sólo se pueden descubrir tras complicados análisis, sus características estructurales pueden determinarse en gran medida con unas pocas consideraciones elementales. Estas consideraciones nos revelan un Universo lleno de asombrosas sorpresas.

1.1 ESTRUCTURA A CADA ESCALA

La naturaleza presenta una jerarquía de estructuras. Desde los constituyentes más pequeños del átomo hasta los agrupamientos de

galaxias a gran escala, observamos sistemas de organización y tamaño característicos, ordenados de tal modo que cada nivel de estructura se entrelaza con los otros de forma muy coherente. ¿Qué determina la escala de estas estructuras y su relación con las demás? ¿Por qué las galaxias son tan grandes y los átomos tan pequeños? ¿Por qué las estrellas son tan calientes y el cielo nocturno es tan oscuro?

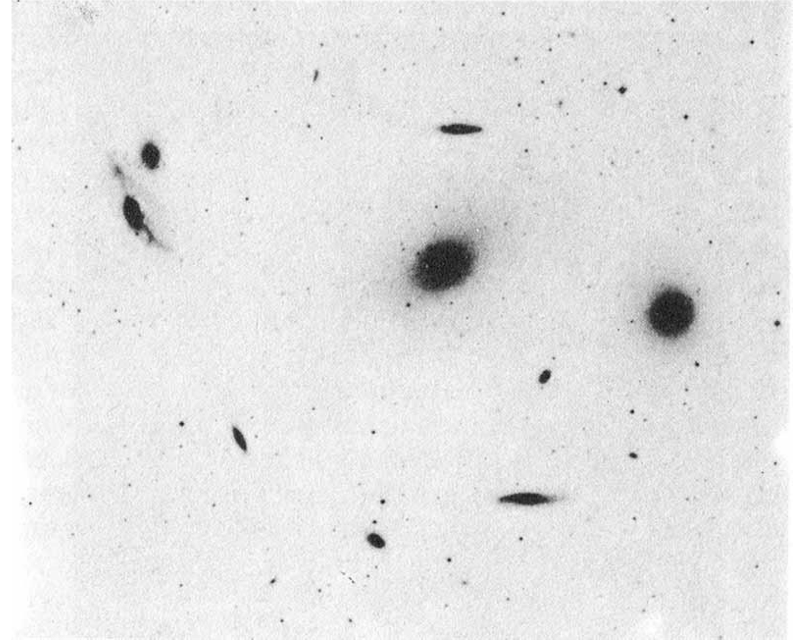


Fig. 1. El cúmulo de galaxias de Virgo es uno de los cúmulos más cercanos a nuestro Grupo. (Escala: 26 segundos de arco/mm.) Con permiso del UK Schmidt Telescope Unit, Royal Observatory, Edinburgh.

La mayor estructura con la que estamos familiarizados es la galaxia, de la cual nuestra Vía Láctea es un ejemplo típico. Contiene unas 10^{11} estrellas y tiene forma de disco con una esfera central de

estrellas muy densamente apiñadas. El conjunto total de estrellas, nubes de gas y algunos granos de polvo, gira lentamente. Las estrellas no están distribuidas uniformemente por toda la galaxia, sino que tienden a concentrarse en brazos de forma espiral. Una galaxia típica tiene unos 10^5 años luz de diámetro.

Las galaxias tienden a acumularse, formando grupos que van desde unas pocas docenas a muchos miles de galaxias. Hay indicios observacionales considerables de que por encima de esta escala de estructura el Universo presenta una extraordinaria uniformidad en la distribución de materia y radiación[1]. Esta uniformidad lo es tanto en orientación con respecto a nosotros (isotropía) como de región a región a distintas distancias de nosotros (homogeneidad).

El conjunto total de galaxias no está en reposo. La fuerza de la gravedad siempre intenta fundir el material disperso en grupos más compactos, de forma que toda la materia participa en una continua lucha entre la gravedad y las fuerzas opuestas de dispersión. En objetos relativamente pequeños, como las estrellas y los planetas, la gravedad ha vencido parcialmente. La densidad de estos objetos es unas 10^{30} veces mayor que la densidad cósmica media de la materia.

Los sistemas mayores —galaxias y cúmulos de galaxias— han evitado el desplome gracias a que están girando en órbita las unas alrededor de las otras. La implosión gravitatoria queda contrarrestada por los efectos centrífugos. Además, los cúmulos de galaxias no caen unos sobre otros por el hecho de que el Universo como un todo está inmerso en una expansión sistemática, en la que cada cúmulo se aleja de sus vecinos. La expansión del Universo, descubierta por Edwin Hubble en los años 20, es una piedra angular de la cosmología moderna; la mejor forma de imaginarla es como una conti-

[1] Parece no obstante probada en la actualidad la existencia de supercúmulos, es decir, agrupaciones de cúmulos de galaxias. *(N. del T.)*

nua dilatación o extensión del propio espacio. A medida que se expande el espacio entre las galaxias, éstas se alejan las unas de las otras.

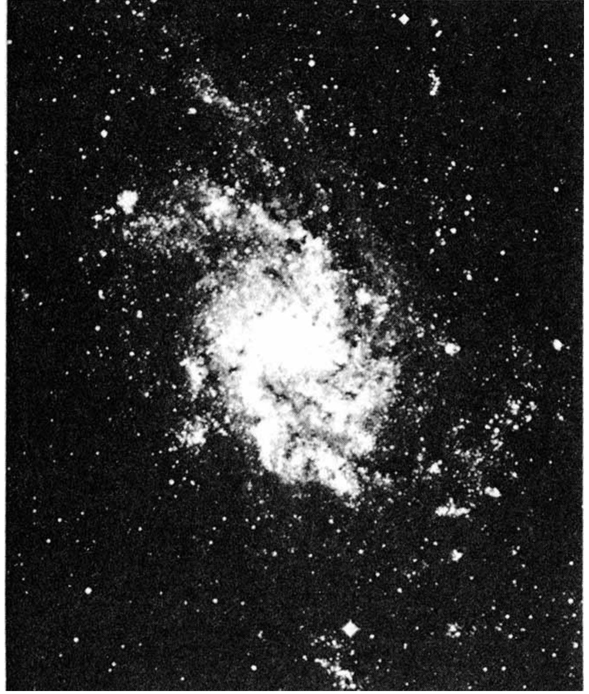


Fig. 2. Una galaxia espiral típica, en la constelación del Triángulo. Nuestra Vía Láctea tendría un aspecto similar vista desde lejos.

Igual que ocurre con la distribución de la materia, la expansión es sorprendentemente uniforme en todo el Universo. Dada esta gran uniformidad del Universo a gran escala, el movimiento de todo su conjunto se puede caracterizar con un solo parámetro: la velocidad de separación de dos galaxias típicas a una cierta distancia una de otra. Este parámetro es la constante de Hubble, designada por *H.* Los astrónomos le suelen otorgar el valor de 50 km/s y por megaparsec,

lo cual quiere decir que dos galaxias separadas, digamos, por 10 megaparsecs (unos 30 millones de años luz), se alejan la una de la otra a unos 500 km/s. Poniéndolo en unidades más familiares, $H \simeq 10^{-18}$ s^{-1}.

Si en la actualidad las galaxias se están alejando unas de otras, en el pasado deben haber estado más agrupadas. Las unidades de *H* son las de velocidad/distancia, es decir, el inverso del tiempo; por lo tanto, invirtiendo *H* obtenemos una unidad fundamental de tiempo —el tiempo de Hubble— que nos permite estimar el cambio cosmológico. El valor de H^{-1} es de unos 10^{10} años. Así, hace unos 10^{10} años la estructura a gran escala del Universo debía ser muy diferente de la actual, y las galaxias mucho más apiñadas.

A medida que el Universo se expande lentamente, las fuerzas gravitatorias intergalácticas actúan frenando la dispersión de las galaxias. Sería de esperar, pues, que el ritmo de expansión, *H*, disminuyera gradualmente, de la misma forma que un proyectil lanzado verticalmente se desacelera poco a poco. Hay, en efecto, ciertos indicios observacionales de que el ritmo de la expansión cosmológica está disminuyendo.

Si aceptamos que la expansión del Cosmos se va desacelerando, debemos concluir que hace unos 10^{10} años el ritmo de expansión era mayor que ahora. Si retrocedemos en el tiempo deberemos encontrar un ritmo de expansión cada vez mayor para que las galaxias hayan podido escapar de la atracción gravitatoria mutua. Extrapolando tanto como nos es posible, parece que hace unos 18 mil millones de años el Universo estaba infinitamente comprimido y se expandía a una velocidad infinita. Esta fase densa y explosiva se conoce popularmente con el nombre de *Big Bang* (Gran Explosión). Dado que tuvo lugar hace un tiempo finito, se identifica a menudo con la creación del Universo.

En la **figura 3** se representa la expansión desde la nada de un volumen típico de espacio (p. ej., un año luz cúbico medido en la

actualidad). Obsérvese la rápida desaceleración del ritmo de expansión en las primeras etapas, seguida por una disminución constante que, es de esperar, continuará en el futuro. Esta menor desaceleración se debe a que la gravedad se hace más débil a mayor distancia. A medida que las galaxias se separan, las fuerzas gravitatorias intergalácticas ejercen una menor resistencia a la expansión. Debido a la rápida desaceleración inicial del ritmo de expansión, el tiempo de Hubble, H^{-1}, es aproximadamente igual (salvo factor de unos 3/2) a la edad del Universo. Obsérvese que H no es, pues, realmente una constante, a pesar de su nombre.

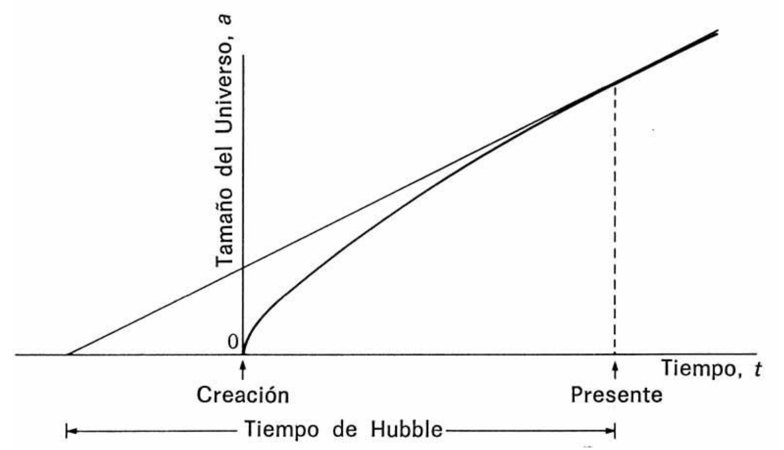


Fig. 3. El Universo en expansión. El espacio se dilata continuamente; con ello disminuye la densidad de materia y las galaxias se alejan unas de otras. La curva muestra cómo el diámetro de un volumen esférico dado de espacio crece a un ritmo cada vez menor. El ritmo de expansión actual, H, definido como $\dot{a}/a$, donde a es el radio de un volumen esférico típico de espacio, viene dado por la tangente a la curva en el instante señalado como "presente". Da lugar a un tiempo característico, H^{-1} llamado el tiempo de Hubble, que es aproximadamente una vez y media la edad del Universo.

Aunque las galaxias parezcan islas de materia luminosa rodeadas de vastas extensiones de espacio vacío, las regiones intergalácticas

no están totalmente vacías. No hay duda alguna de que albergan una cierta cantidad de materia transparente o ligeramente oscura. Más importante aún, todo el espacio, incluyendo estas extensiones aparentemente vacías, está lleno de radiación calorífica. Esta radiación impregna todo el Universo de un brillo extremadamente tenue —su temperatura es de unos 3°K. La extraordinaria isotropía de esta radiación cósmica de fondo recibida en la Tierra es una buena prueba de la extraordinaria uniformidad del Universo a gran escala. La radiación calorífica ha atravesado distancias cosmológicas sin impedimento alguno y, de haberla, llevaría consigo la impronta de cualquier irregularidad a gran escala.

Uno de los misterios fundamentales de la cosmología moderna es por qué la temperatura de la radiación calorífica cósmica es precisamente de 3°K y no cualquier otro valor. De hecho, a medida que el Universo se expande, la temperatura desciende. Pero el cociente entre el número de fotones térmicos y el número de, digamos, protones o electrones, en un volumen grande determinado, no varía con la expansión cósmica (según veremos con detalle en el **apartado 2.4**). La relación fotón por protón se simboliza por *S*, y tiene un valor aproximado de 10^9. Evidentemente, los fotones son considerablemente más numerosos que los átomos.

Si pasamos a escalas de tamaño menores que las galaxias, nos encontramos con las estructuras más familiares del Universo: las estrellas. Las estrellas se mantienen en equilibrio porque su propia fuerza gravitatoria, que intenta comprimirlas, se contrarresta por la presión interna generada por las reacciones nucleares que tienen lugar en su interior. Los planetas, menores y más fríos que las estrellas, superan su propia gravedad gracias a fuerzas de estado sólido que son de origen fundamentalmente eléctrico. Las estrellas se agrupan a menudo en cúmulos de hasta un millón de miembros.

Si reducimos la escala una vez más, nos encontramos con los grandes organismos vivientes (incluido el hombre), que constituyen

las estructuras más desarrolladas que se conocen en cuanto a complejidad. Descendiendo más allá de la célula y las cadenas de moléculas biológicamente activas como el DNA, llegamos al nivel de los átomos, que también son sistemas compuestos y poseedores de estructura interna.

El núcleo de los átomos consiste en dos tipos de partículas: los protones, cargados eléctricamente, y los neutrones. Ambos tienen una masa de unos 10^{-27} kg. Cuando están aislados, los neutrones se desintegran en protones y electrones; su vida media es de unos pocos minutos. En la desintegración se emite además otra partícula, el antineutrino —la antipartícula del neutrino— (ver **apartado 1.3**). Los neutrinos son eléctricamente neutros, no tienen masa, o, si la tienen, es muy pequeña, e interaccionan tan débilmente con la materia ordinaria que atraviesan la Tierra con extrema facilidad. En consecuencia, los neutrinos son extraordinariamente huidizos y su existencia no fue inequívocamente confirmada hasta después de la Segunda Guerra Mundial. No obstante, juegan un papel importante en la estructura del Universo.

El protón es el constituyente fundamental de la estructura nuclear (ver **fig. 4**). Los elementos químicos están determinados por el número de protones que contienen en el núcleo. El núcleo del elemento más simple, el hidrógeno, consta de un solo protón. El del isótopo del hidrógeno llamado deuterio contiene un protón y un neutrón. Su carga nuclear es, pues, la misma que la del hidrógeno ordinario, si bien su núcleo es unas dos veces más masivo.

El siguiente elemento más simple es el helio, que en su forma normal contiene dos protones y dos neutrones. Si seguimos hacia arriba, encontramos al litio, con tres protones, al berilio con cuatro, etc. Elementos importantes son el carbono, con seis protones, el oxígeno con ocho, el hierro con 26 y el uranio con 92. Los elementos pesados, como el uranio, contienen normalmente alrededor de un 50% más de neutrones que protones. Muchos de ellos son radiactivos. La vida media de los elementos más pesados que el uranio es

menor que la edad de la Tierra; en consecuencia, no se encuentran en abundancia en ella.

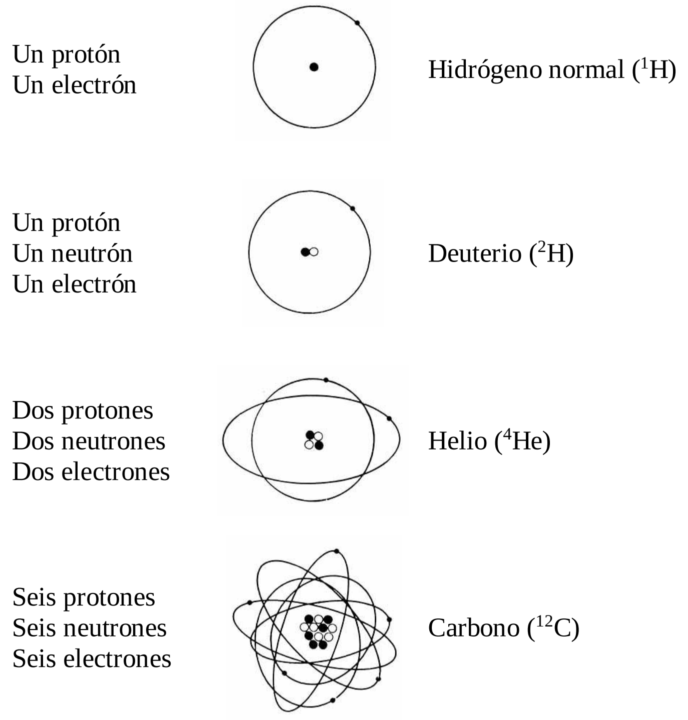


Fig. 4. Los elementos químicos. La química de un átomo está determinada por su carga nuclear (número de protones), que en su estado normal corresponde exactamente al número de electrones. Cuando un átomo pierde electrones se dice que está *ionizado*. Los electrones exteriores contribuyen a la unión de unos átomos con otros para formar moléculas. Los átomos más pesados y complejos contienen unas 250 partículas nucleares y unos 90 electrones.

Dada la capital importancia del protón, sus propiedades son de especial relevancia para la física nuclear (y también para la física atómica y química). Entre estas propiedades se cuentan su masa, su

carga eléctrica y su tamaño. El tamaño de un protón es un concepto bastante delicado que discutiremos en el **apartado 1.3**. De momento admitiremos que es de unos 10^{-15} m. Podemos convertir esta distancia en una unidad fundamental de tiempo: lo que tarda la luz en atravesar un protón. La velocidad de la luz es la mayor velocidad a que puede viajar la información y es por lo tanto de especial trascendencia. El tiempo que tarda la luz en atravesar un protón es de unos 10^{-24} s. Físicamente, éste es el menor intervalo de tiempo necesario para que un protón se manifieste de forma íntegra como una sola entidad.

Tenemos pues dos escalas de tiempo naturales: el tiempo de Hubble, $t_H \sim 10^{10}$ años, y el tiempo nuclear, que representaremos por $t_N \sim 10^{-24}$ s. El cociente entre ambos es nada más y nada menos que 10^{41}. El origen de este número tan extraordinariamente grande y el porqué de su magnitud serán un tema importante de los próximos capítulos.

1.2 LAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

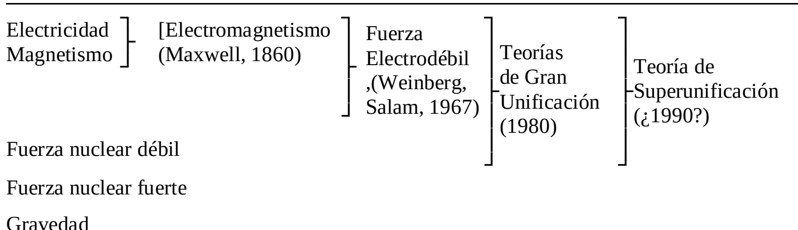
Según nuestros conocimientos, los diversos fenómenos naturales están controlados por sólo cuatro fuerzas fundamentales: la gravedad, el electromagnetismo, y dos fuerzas nucleares llamadas débil y fuerte. En los últimos años se ha intentado describir estas cuatro fuerzas mediante una sola teoría matemática. El llamado programa de unificación ha logrado entretejer la fuerza nuclear débil con la fuerza electromagnética, y muy recientemente se han realizado progresos en la incorporación de la fuerza nuclear fuerte (ver tabla 1).

Todos conocemos la gravedad. Actúa entre todos los cuerpos materiales del Universo y disminuye con la distancia, según la famosa ley del inverso del cuadrado de Newton. En el caso de dos masas puntuales idealizadas, cada una de ellas experimenta una fuerza dirigida hacia la otra cuyo valor es:

$$F_{grav} = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \tag{1.1}$$

En esta fórmula, el signo negativo indica que la fuerza es de atracción; r es la separación entre los dos cuerpos (cuyo tamaño se supone pequeño comparado con r), y m_1 y m_2 son sus masas respectivas. G es una constante universal de gran significación. Controla la magnitud de las fuerzas gravitatorias ejercidas por las masas. Si elegimos dos masas m_1 y m_2 de, por ejemplo, 1 kg cada una, y si damos a r un valor determinado, por ejemplo 1 m, entonces observaremos que la fuerza de atracción es de $6{,}7\times10^{-11}$ N. Si G fuera mayor, la fuerza sería proporcionalmente mayor. La afirmación de que G es una constante universal equivale a decir que en cualquier lugar del Universo y en cualquier época de su historia si midiéramos la fuerza entre dos masas de 1 kg separadas 1 m el resultado siempre sería de $6{,}7\times10^{-11}$ N. En consecuencia, G constituye, junto con otras magnitudes fundamentales, una importante constante de la naturaleza que determina la estructura de los sistemas gravitatorios.

Tabla 1. Las fuerzas de la naturaleza



Análisis cada vez más detallados ponen de manifiesto que las diferentes fuerzas de la naturaleza son en realidad manifestaciones de muy pocas —tal vez una— fuerzas fundamentales. Todas las interacciones conocidas pueden reducirse en último término a cuatro formas básicas: electromagnetismo, gravedad y dos fuerzas nucleares. El electromagnetismo y la fuerza nuclear débil, si bien difieren mucho en su modo de actuación, son en realidad dos aspectos de una única fuerza electrodébil unificada. Resultados recientes parecen indicar que la fuerza nuclear fuerte, también de carácter muy distinto, puede incluirse a su vez en este esquema en una teoría de gran unificación (GUT). Sólo falta incorporar la gravedad.

En el presente siglo se ha reemplazado la teoría de la gravedad de Newton por una nueva, la llamada teoría general de la relatividad, debida a Albert Einstein. Si bien los resultados de la relatividad general difieren un tanto de los de la teoría de Newton en el caso de campos gravitatorios fuertes, ambas coinciden en el límite de los campos débiles, lejos de los cuerpos que ejercen una fuerte influencia gravitatoria. Así, la ley del inverso del cuadrado de la distancia de Newton y el significado de la constante G siguen siendo válidas en la teoría de Einstein.

Sin embargo, la teoría general de la relatividad tiene una característica que no posee la teoría de Newton. Es posible incluir una fuerza gravitatoria adicional, además de la atracción según el inverso del cuadrado de la distancia. Esta nueva fuerza gravitatoria se caracteriza por dos propiedades excepcionales. En primer lugar, es repulsiva; hace que la materia se disperse en lugar de atraerse como en el caso de la gravedad newtoniana. En segundo lugar, la magnitud de esta repulsión aumenta con la distancia, mientras que en la gravedad "ordinaria" disminuye de acuerdo con (1.1). Por lo tanto, los efectos de la fuerza adicional solamente se hacen importantes a muy gran escala. Por este motivo, Einstein llamó a esta nueva constitución el término cosmológico. En un principio, introdujo este término para explicar cómo el Universo como un todo podía evitar desplomarse bajo las fuerzas de atracción gravitatoria. Con la nueva repulsión cosmológica intentaba equilibrar la atracción de la gravedad ordinaria y conseguir un Universo estático.

Una vez introducido el término cosmológico en la relatividad general en 1917, Hubble descubrió que el Universo no era estático, sino que se encontraba en estado de expansión. Las galaxias evitan desplomarse unas sobre otras gracias a su movimiento de escape. Tras el hallazgo de Hubble, Einstein consideró que su término cosmológico era un gran error y lo abandonó rápidamente. Sin embargo, no hay ninguna razón *a priori* para desecharlo y, como veremos, la moderna teoría cuántica de campos precisa de forma inequívoca de

un término tal. De todos modos, la magnitud de la repulsión es todavía extraordinariamente pequeña. Si representamos la fuerza repulsiva en la forma:

$$F_{\text{cósmica}} = \Lambda rmc^2 \qquad (1.2)$$

donde m es la masa del objeto repelido, r es la distancia al objeto repulsor y c es la velocidad de la luz, entonces Λ es una constante cuyas unidades son m^{-2}. (Obsérvese que la fuerza es independiente de la masa repulsora.)

Las observaciones actuales nos proporcionan una cota superior para Λ de 10^{-53} m^{-2}. Así, dos masas de un kilogramo cada una y a un metro de distancia entre sí sentirían una fuerza de atracción que como mínimo sería 10^{25} veces mayor que la repulsión cósmica. Por otra parte, dos galaxias cuyas masas fueran, por ejemplo, de 10^{41} kg y estuvieran separadas por una distancia de 10^6 años luz (unos 10^{22} m) experimentarían fuerzas atractivas y repulsivas comparables si el valor de Λ fuera muy próximo a su cota superior. Así pues, si bien nunca se ha medido Λ, la tomaremos como una constante universal de fundamental importancia para la estructura a gran escala del Universo. Más adelante veremos que Λ no es estrictamente constante.

Pasemos ahora al electromagnetismo. Tanto la electricidad como el magnetismo deben su origen a la carga eléctrica. La fuerza de interacción entre dos cargas eléctricas depende, de forma complicada, tanto de su posición como de su movimiento, estando los efectos eléctricos y magnéticos entrelazados. No obstante, hay un caso sencillo, que es aquel en que las dos cargas están en reposo. Si las magnitudes de las cargas son respectivamente e_1 y e_2 y cada una de ellas se supone concentrada en un punto, entonces la fuerza que se ejercen una a otra es de naturaleza puramente eléctrica y viene dada por una fórmula casi idéntica a (**1.1**):

$$F_{elec} = \frac{e_1 e_2}{4\pi\varepsilon r^2} \qquad (1.3)$$

La fuerza eléctrica actúa en la línea que une ambas cargas, y es atractiva o repulsiva según los signos relativos de e_1 y e_2. De nuevo ε es una constante universal que determina la magnitud de los efectos electromagnéticos. Su valor es de $8{,}85\times10^{-12}$ F m^{-1}. Por lo tanto, dos cargas en reposo de un coulomb cada una y a un metro de distancia experimentan una fuerza de $8{,}99\times10^{9}$ N.

Se ha comprobado experimentalmente que la carga eléctrica siempre va asociada a ciertas partículas subatómicas, de las cuales las más conocidas son el electrón y el protón. La cantidad de carga de estas partículas es siempre la misma; es una constante universal de la naturaleza. En unidades SI, su valor es de $1{,}6\times10^{-19}$ C. Por convención se toma la carga del protón como positiva. La denotamos por *e*.

En cuanto a las fuerzas magnéticas, no hay ningún dato observacional que sugiera la existencia de una carga magnética análoga a la carga eléctrica; las fuerzas magnéticas están originadas totalmente por corrientes eléctricas (cargas eléctricas en movimiento). No obstante, algunas teorías modernas sobre las fuerzas unificadas predicen la existencia de carga magnética. En cualquier caso, no hace falta introducir una nueva unidad fundamental, ya que Paul Dirac mostró que la cantidad de carga magnética en una partícula debe ser un múltiplo de una unidad básica que viene totalmente determinada por la unidad fundamental de carga eléctrica, e. Así pues, e determina tanto la magnitud de la electricidad como la de la, en caso de que exista, magneticidad.

Pasemos ahora a las dos fuerzas nucleares y consideremos en primer lugar la fuerza débil. Esta fuerza es la responsable de muchos procesos nucleares, de los cuales uno de los más conocidos es el de la transmutación de neutrones en protones. Así pues, la fuerza débil se manifiesta más a través de cambios de identidad de las partículas

que en el movimiento de éstas. Ello no obstante, podemos caracterizar su magnitud por una constante universal g_W, que determina el ritmo a que se producen las transformaciones inducidas por la fuerza débil, tales como la desintegración del neutrón.

La naturaleza de la fuerza nuclear fuerte es considerablemente más complicada que la de las otras fuerzas. En su forma más general, la fuerza fuerte es la responsable de la unión de los protones y los neutrones en los núcleos atómicos. Sin la fuerza fuerte, el núcleo explotaría como resultado de la repulsión eléctrica entre los protones. Podemos también en este caso introducir una magnitud g_S, análoga a la carga eléctrica pero considerablemente mayor, como el nombre "fuerte" sugiere. No obstante, el concepto de g_S tiene solamente un valor limitado. Por una parte, la fuerza fuerte no obedece a ninguna ley del inverso del cuadrado de la distancia tal como (**1.1**) o (**1.3**), sino que decrece rápidamente hasta hacerse cero a una distancia mayor de 10^{-15} m. En segundo lugar, los protones y los neutrones son también cuerpos compuestos que han de estar unidos internamente por una fuerza muy fuerte. En realidad, la fuerza que actúa entre protones y neutrones no es más que un indicio de esta fuerza interna. Dado que nuestro conocimiento de la estructura interna de los protones y los neutrones está todavía en un estado rudimentario e hipotético, emplearemos aquí el concepto de g_s como una medida aproximada de la magnitud de la interacción fuerte, concepto que si bien no es tan fundamental sí es más sencillo.

1.3 TEORÍA CUÁNTICA Y RELATIVIDAD

La estructura de nuestro mundo no está determinada sólo por las fuerzas de la naturaleza, sino también por las leyes que gobiernan el movimiento de los cuerpos bajo la influencia de estas fuerzas. En la escala de nuestra experiencia cotidiana, estas leyes están bien establecidas en la mecánica de Newton. Sin embargo, hay tres circunstancias que las leyes de Newton no describen adecuadamente.

En primer lugar, si la velocidad de los cuerpos en cuestión se aproxima a la velocidad de la luz, entonces el movimiento difiere de las predicciones newtonianas debido a los efectos de la relatividad especial. La velocidad de la luz, simbolizada por *c*, es un límite superior a la velocidad de los sistemas materiales. Podemos tomar *c* como otra cantidad fundamental y universal de gran importancia en la determinación del orden del Universo.

En segundo lugar, si el campo gravitatorio es intenso, no sólo es necesario abandonar la ley de la gravedad de Newton, sino también la mecánica newtoniana. Según la teoría general de la relatividad, la gravedad es una distorsión del espacio-tiempo semejante a la curvatura de una superficie, como, por ejemplo, una esfera. Cuando se mueve por este medio distorsionado, una partícula no se comporta como predice la teoría newtoniana.

Finalmente, las leyes de Newton tampoco se aplican cuando el tamaño del sistema que se estudia es comparable al del átomo. Es necesario usar la teoría cuántica para describir el comportamiento de los campos y partículas submicroscópicos.

La característica fundamental de la teoría especial de la relatividad es el hecho de que todo observador, independientemente de como se esté moviendo, mide la misma velocidad para la luz. Así pues, *c* es una constante universal de la naturaleza. Sólo es posible entender esta paradójica situación suponiendo que los intervalos espaciales y temporales no son invariantes, sino que cambian de un sistema de referencia a otro, produciendo los famosos efectos de dilatación temporal y contracción de las distancias.

Dado que siempre se observa que la luz viaja a velocidad *c*, es obviamente imposible que un observador alcance (o supere) la velocidad de la luz. Esta velocidad actúa como una especie de barrera para la propagación de cualquier cuerpo material o de cualquier tipo de influencia. Toda perturbación física debe viajar a una velocidad menor o igual que *c*. De ahí que la mecánica de los cuerpos que se

mueven a grandes velocidades presenta algunas características singulares. Por ejemplo, la energía E y la masa m_0 (medida en reposo) de un cuerpo que se mueve a una velocidad v relativa a un observador dado vienen relacionadas por la fórmula:

$$E = m_0 c^2/\sqrt{(1 - v^2/c^2)} \qquad (1.4)$$

A medida que v se aproxima a c la energía del cuerpo aumenta sin límite, lo cual implica que es necesario suministrar una cantidad infinita de energía para que el cuerpo pueda alcanzar la velocidad de la luz. En el límite opuesto, cuando $v = 0$ el cuerpo está en reposo, pero la energía no se anula. Se obtiene:

$$E_{\text{reposo}} = m_0 c^2 \qquad (1.5)$$

Esta energía en reposo no es debida a ningún tipo de movimiento, sino exclusivamente a la masa m_0 del cuerpo. A veces esto se expresa diciendo que masa y energía son equivalentes, o que la energía tiene masa, o que la masa es energía.

Como ejemplo consideremos el Sol, que emite unos 10^{26} J s^{-1}. Esta pérdida de energía es equivalente a una masa de 4 millones de toneladas, de forma que cada segundo el Sol se hace 4×10^6 toneladas más ligero.

Consideremos otro ejemplo. El del núcleo de oxígeno contiene ocho protones y ocho neutrones fuertemente unidos entre sí. La masa de un núcleo de oxígeno es de $2{,}655\times10^{-26}$ kg. Ahora bien, la suma de las masas de ocho protones y de ocho neutrones independientes es de $2{,}678\times10^{-26}$ kg. Los $2{,}3\times10^{-28}$ kg que faltan corresponden a la energía que se pierde cuando las partículas nucleares se reúnen para formar un sistema ligado.

A veces se escribe la ecuación (1.4) de la forma:

$$E = mc^2 \qquad (1.6)$$

donde $m = m_0(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ es la llamada *masa relativista.* Su valor depende de la velocidad *v.* Entonces m_0 recibe el nombre de *masa en reposo,* que es el valor de *m* en reposo ($v = 0$).

Si una partícula viaja a la velocidad de la luz (y éste es, como veremos, el caso de los fotones) entonces la ecuación (**1.4**) nos indica que, para que *E* sea finita, $m_0 = 0$. En este caso, la parte de la derecha de la igualdad de (**1.4**) es 0/0, que puede ser una cantidad finita. De hecho, la energía de una partícula de luz depende de su frecuencia, y viene dada por la ecuación (1.7), que daremos más abajo. Así pues, si una partícula tiene masa en reposo nula, viaja a la velocidad de la luz. A menudo los físicos dicen que una partícula tal "no tiene masa". Esta descripción se refiere a la masa *en reposo.* La partícula tiene una masa relativista *de* $m = E/c^2$.

A continuación haremos una breve descripción de la teoría cuántica. El concepto de partícula se hace borroso cuando tomamos en consideración los efectos cuánticos, de manera que, por ejemplo, un electrón se comporta en muchas ocasiones de una forma que en general se asocia con una onda. Así, los electrones se difractan alrededor de los objetos y forman figuras de interferencia. En otras ocasiones su comportamiento parece errático: atraviesan barreras o rebotan en obstáculos imperceptibles. Pero también se puede modificar el concepto de onda en el mundo submicroscópico de manera que, por ejemplo, la luz, que es una onda electromagnética, se emite, se absorbe o se dispersa como si estuviera constituida por pequeñas partículas o corpúsculos. Estos *fotones* fueron los "paquetes" o "cuantos" primitivos que dieron su nombre a la teoría.

Estas peculiaridades onda–partícula, características de los efectos cuánticos, adquieren importancia a una escala determinada por la constante de Planck *h,* cuyo valor es de $6{,}6 \times 10^{-34}$ J s. Se utiliza más frecuentemente la cantidad $h/2\pi$, simbolizada por $\hbar$. En el contexto del comportamiento corpuscular de las ondas, *h* es el cociente entre la energía y la frecuencia de un fotón. Así:

$$E = h\nu \quad (1.7)$$

Para los aspectos ondulatorios de las partículas, h es el producto del momento p por la longitud de onda λ. Así,

$$p = h/\lambda. \quad (1.8)$$

Apelamos a la teoría cuántica cuando las magnitudes mecánicas de interés son del orden de h. Por ejemplo, un electrón en órbita en un átomo tiene una energía cinética de unos 10^{-19} J y un período orbital de alrededor de 10^{-15} s. Así pues, el producto de la energía y el tiempo de un período es $\sim 10^{-34}$ J s, que es comparable a h. Podemos concluir, pues, que los efectos cuánticos modificarán profundamente el comportamiento de los electrones atómicos, conclusión ésta que se cumple en la práctica.

Dado que la aplicación de la teoría cuántica al campo electromagnético nos proporciona una descripción del transporte de energía y de momento en forma de fotones discretos, debemos tener en cuenta esta perturbación cuantizada en aquellos procesos en que interactúan cargas eléctricas y corrientes. En la teoría clásica de la electrostática, la ley del inverso del cuadrado de la distancia (1.3), se interpreta en el lenguaje de campos diciendo que la carga e_1 crea un campo eléctrico de fuerza a su alrededor y que la carga e_2 interactúa con este campo en un punto a una distancia r. La interacción entre e_2 y el campo es lo que produce la fuerza. Si de alguna forma perturbáramos e_1, *el* efecto se transmitiría a e_2 a través del campo, y e_2 respondería de acuerdo con este efecto. En la teoría cuántica se considera que la perturbación se transmite igualmente a través del campo, pero en forma de fotones. Cuando movemos e_1, ésta emite fotones que son posteriormente absorbidos por e_2, que se mueve en consecuencia. Así, la fuerza electromagnética se describe en términos de *intercambio* de cuantos de campo, que actúan como mensajeros entre las fuentes. (Para generalizar esta descripción a la fuerza

electrostática en sí misma, en ausencia de perturbación sobre la carga, es necesario introducir un tipo de fotón diferente de los que producen la sensación de luz.)

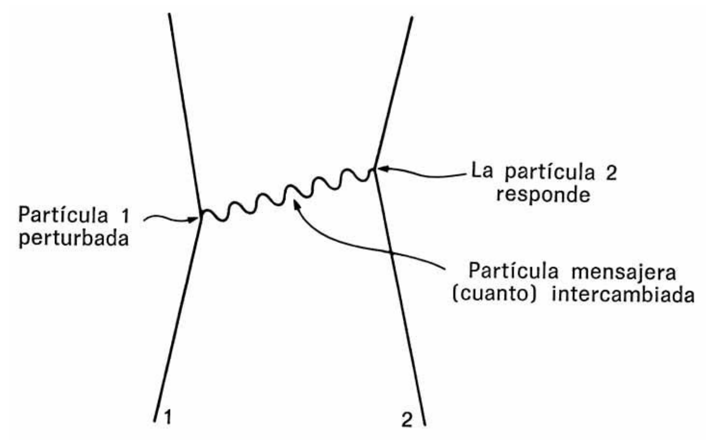


Fig. 5. Descripción cuántica de las fuerzas. He aquí el mecanismo básico de transmisión de fuerzas entre partículas. Las líneas rectas muestran los caminos seguidos por las partículas que producen la fuerza. Cuando la partícula 1 es perturbada emite un cuanto del campo de fuerzas "virtual" o creado de forma temporal (p. ej., un fotón del campo electromagnético) que posteriormente es absorbido por la segunda partícula. Entonces la partícula 2 sufre una perturbación. De esta forma las partículas pueden ejercerse influencias mutuas a distancia. Una descripción de este tipo se aplica a todas las fuerzas de la naturaleza.

Las otras fuerzas de la naturaleza también pueden describirse mediante el intercambio de cuantos de campo (ver **fig. 5**). Por ejemplo, podemos atribuir la fuerza gravitatoria al intercambio de gravitones. La fuerza débil supone el intercambio de partículas llamadas bosones vectoriales. Según la última versión de la teoría de la fuerza débil, son necesarias tanto partículas cargadas como neutras (llamadas respectivamente partículas *W* y *Z*). La masa de las partículas *W* y *Z* es muy grande (muchas veces mayor que la de los protones). En el

próximo capítulo discutiremos más detalladamente la fuerza fuerte, que es más complicada.

Al combinar los efectos cuánticos y relativistas nos encontramos con un nuevo fenómeno: la creación y destrucción de partículas subatómicas. La relación $E = m_0c^2$ parece indicar que con una energía de m_0c^2 se puede crear una partícula de masa en reposo m_0. Esto lo confirman los experimentos. Por ejemplo, se puede crear un electrón a partir de un fotón muy energético (un rayo gamma). Para que se conserve la carga eléctrica, es necesario que el electrón creado venga acompañado de una partícula "reflejada" con carga opuesta (positiva). Esta partícula, llamada positrón, fue descubierta en 1932. Tiene la misma masa que el electrón. De ahí que simbolicemos el electrón por e^- y el positrón por e^+.

Se pueden crear otras partículas a partir de la energía. Los protones y los neutrones (simbolizados respectivamente por p y n) se crean en compañía de sus respectivas partículas reflejadas, simbolizadas por $\bar{p}$ y $\bar{n}$. Se puede ver que toda partícula tiene, en este sentido, su correspondiente partícula reflejada, su *antipartícula*–, $\bar{p}$ es un antiprotón, $\bar{n}$ es un antineutrón y e^+, el positrón, es un antielectrón. Las antipartículas constituyen genéricamente la denominada *antimateria.* Normalmente, la creación de partículas supone la aparición simultánea de un par partícula–antipartícula, por ejemplo e^+, e^-, de manera que a menudo se habla de creación de pares. En algunos casos (p. ej., el del fotón) la partícula es indistinguible de su antipartícula, de forma que tales partículas pueden ser creadas individualmente.

La energía necesaria para la creación de un par, $2m_0c^2$, puede suministrarse de muchas formas distintas; por ejemplo: energía cinética liberada en el impacto de otras dos partículas, energía calorífica, energía potencial electromagnética, o la energía en reposo de alguna otra partícula.

El proceso inverso de la creación de pares, la aniquilación de pares, tiene lugar cuando una partícula se encuentra con su antipartícula. Por ejemplo, un electrón y un positrón muy próximos se destruirán en general; ambas partículas desaparecerán por completo produciendo dos o tres fotones.

Cuando los efectos cuánticos y relativistas se combinan de esta forma, no es de extrañar que las relaciones (**1.6**) y (**1.7**) sean simultáneamente pertinentes. Combinando ambas se obtiene la relación:

$$c/v = h/mc \,. \qquad (1.9)$$

Las unidades son de longitud. Si m es la masa en reposo de una partícula, entonces h/m_0c es una longitud característica asociada a dicha partícula. Se conoce con el nombre de *longitud de onda Compton*, en honor de Arthur Compton. Para un protón su valor es de unos 10^{-15} m.

Si bien la creación estable de una nueva partícula de masa en reposo m_0 requiere un aporte de energía de m_0c^2, la misma partícula puede crearse temporalmente en ausencia de todo aporte de energía. La razón tiene que ver con el principio de incertidumbre de Heisenberg, que permite la suspensión de la ley de conservación de la energía en una cierta cantidad ΔE durante un tiempo Δt, donde:

$$\Delta E \Delta t \sim h. \qquad (1.10)$$

Por lo tanto, la energía m_0c^2 puede "tomarse prestada" durante un tiempo $\Delta t \sim h/m_0c^2$ para producir temporalmente una partícula, llamada virtual. Evidentemente, esta partícula tiene una existencia efímera y desaparece de nuevo. En consecuencia, no puede ir muy lejos. Aunque se moviera a la velocidad de la luz (el límite superior) su autonomía sería de $c\Delta t$, que no es más que la cantidad que aparece a la derecha de la ecuación (**1.9**). Así pues, la longitud de onda Compton es el máximo alcance o autonomía de una partícula virtual.

Según el modelo cuántico, la transmisión de fuerzas se produce mediante un intercambio de partículas mensajeras entre otras partículas (**fig. 5**). En general, estas partículas mensajeras son virtuales y, en consecuencia, su alcance estará limitado a la longitud de onda Compton. En el caso de las fuerzas electromagnéticas, los mensajeros virtuales son fotones. Éstos tienen masa en reposo cero; por tanto, su longitud de onda Compton es infinita, al igual que su alcance. Ésta es la razón de que las fuerzas electromagnéticas puedan actuar a distancias macroscópicas. Lo mismo ocurre con las fuerzas gravitatorias (el gravitón tampoco tiene masa). En cambio, la masa de las partículas W y Z de la interacción débil es muy grande, de manera que el alcance de la interacción débil es muy pequeño ($\ll 10^{-15}$ m), y está restringido a distancias subnucleares. Algo parecido ocurre en la fuerza nuclear fuerte que actúa entre protones y neutrones.

En los procesos subatómicos con emisión y absorción de fotones es necesario considerar conjuntamente los efectos de la teoría cuántica y del electromagnetismo. Esto implica que el desarrollo de tales procesos dependerá de las tres constantes e, h y c. Cuando multiplicamos la velocidad de los fotones c por la constante de Planck h (y por la constante eléctrica ε) obtenemos una cantidad que tiene unidades de (carga eléctrica)^2, de manera que podemos combinar e, h y c para obtener un cociente adimensional (un número puro) que simbolizamos por α

$$\alpha \equiv e^2/4\pi\varepsilon\hbar c = 1/137{,}036. \qquad (1.11)$$

Esta cantidad interviene en todos aquellos procesos en los que hay interacción entre materia y radiación. Por ejemplo, determina el ritmo de desintegración de un átomo excitado por emisión fotónica, o el ritmo de adquisición de energía cuando el átomo se somete a un chorro de fotones. Determina también el grado de separación de los niveles atómicos de energía en multipletes como resultado del acoplamiento magnético entre el momento magnético intrínseco del

electrón y su campo magnético orbital. Esta estructura, llamada fina, se manifiesta en las líneas espectrales de los átomos excitados. Por este motivo, el cociente (1.11) se conoce como *constante de estructura fina,* si bien su importancia es mucho más general que la que su nombre sugiere.

Los procesos nucleares débiles y fuertes tienen un alcance tan pequeño que siempre actúan a nivel cuántico. Al igual que en el caso del electromagnetismo, podemos combinar las constantes de acoplamiento débil y fuerte g_w y g_s con otras constantes, obteniendo los cocientes adimensionales:

$$g_w m_p^2 c/\hbar^3 \simeq \text{a } 10^{-5} \qquad (1.12)$$

$$g_s^2/\hbar c \simeq \text{a } 15, \qquad (1.13)$$

donde m_P es la masa del protón. El significado de (**1.12**) y (**1.13**) no es tan fundamental como el de α.

Finalmente, y volviendo al tema de la gravedad, podemos combinar las magnitudes $\hbar$, c y G para obtener una unidad fundamental de longitud,

$$l_P = (G\hbar/c^3)^{1/2} \simeq 10^{-35} \text{ m},$$

o de tiempo (1.14)

$$t_P = (G\hbar/c^5)^{1/2} \simeq 10^{-43} \text{ s}$$

que se conocen respectivamente con los nombres de longitud de Planck y tiempo de Planck. Por consideraciones generales, es de esperar que los efectos de la gravedad cuántica se manifiesten a estas escalas de longitud y tiempo. Dado que l_P y t_P están unos veinte órdenes de magnitud más allá de las actuales capacidades experimentales, esta expectativa no puede verificarse de manera directa.

Vale la pena observar que t_P representa una nueva unidad fundamental de tiempo que hay que añadir a la edad del Universo t_H y al tiempo nuclear característico t_N. Sus cocientes son aproximadamente:

$$t_N / t_P \sim 10^{20}$$
$$t_H / t_N \sim 10^{40}. \qquad (1.15)$$

1.4 ESTRUCTURA SUBNUCLEAR: UN ESTUDIO DE LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

A pesar de su importancia básica en la estructura de los núcleos atómicos, los protones y neutrones no son los constituyentes más elementales de la materia nuclear. Los datos obtenidos al bombardear las partículas nucleares con electrones de alta energía y otros proyectiles, nos indican que, en realidad, los protones y los neutrones son cuerpos compuestos. Si bien la estructura interna de estas partículas fundamentales sólo se conoce parcialmente, ya empezamos a tener una imagen coherente de la misma.

Parece evidente que un protón es la unión de tres partículas más pequeñas llamadas quarks. El protón contiene dos tipos distintos —o sabores— de quarks: dos llamados "arriba" o quarks *u*, cada uno de ellos con una carga eléctrica de $2e/3$, y uno "abajo" o quark *d*, con una carga eléctrica $-e/3$. Los términos "arriba" y "abajo" son simples designaciones y no tienen nada que ver con orientación vertical. (Lo mismo se aplica a las demás denominaciones de los quarks que veremos a continuación.) El neutrón es la unión de un quark *u* y dos quarks *d*. Cuando un neutrón se desintegra en un quark *u* y se crea un electrón que se lleva consigo una unidad de carga negativa. Así pues, la fuerza nuclear débil es capaz de cambiar el sabor de los quarks.

En realidad, las masas de los quarks no se conocen, si bien se supone que son sustancialmente mayores que la tercera parte de la masa del protón. La razón es que los quarks están fuertemente unidos y por ello emplean gran parte de su masa con energía de unión (ver **página 25**).

Todavía no se conoce bien la naturaleza de la fuerza que actúa entre los quarks. La fuerza que "pega" los quarks entre sí es muy intensa; en la actualidad se ha puesto de manifiesto que la fuerza nuclear fuerte, que a su vez mantiene unidos a los protones y neutrones en el núcleo, es en realidad sólo un vestigio de este potente "pegamento" interno. De acuerdo con los conceptos de la teoría cuántica de campos, la fuerza que actúa entre los quarks se debe al intercambio de otro tipo de cuantos de campo, las partículas conocidas con el nombre de gluones. A pesar de que los gluones no tienen masa, la fuerza que une los quarks es de corto alcance. La razón es que los gluones se atraen entre sí con la misma fuerza fuerte con la que atraen a los quarks. Esto establece una diferencia con los fotones, que no están cargados eléctricamente y son simples emisarios de la fuerza electromagnética entre partículas cargadas.

La mayor parte de los físicos de partículas opinan que la fuerza que actúa entre los quarks aumenta con la distancia. Si ello es así, será imposible separar un conjunto de quarks. Será imposible, por ejemplo, romper un protón en sus tres constituyentes. Esto viene confirmado por los experimentos de colisiones de alta energía, que nunca han conseguido romper un protón.

No es necesario que siempre se combinen tres quarks: un doblete de quarks también está permitido. Una de estas uniones de dos quarks es la $u\bar{d}$, un quark u unido con la antipartícula correspondiente al quark d. Este sistema tiene una carga total de $+e$, pero dado que le falta un tercer quark, es algo más ligera que el protón. Se puede producir la partícula $u\bar{d}$ en el laboratorio; de hecho, se la conoce desde hace más de 30 años con el nombre de mesón pi, o pión,

simbolizado por π^+. La antipartícula del π^+, el doblete $\bar{u}d$, se simboliza por π^-. Existe también un pión neutro, π^0, que puede considerarse como la unión de u y $\bar{u}$, o de d y $\bar{d}$.

El π^0 es muy inestable, ya que el quark puede aniquilarse con su correspondiente antiquark. Tras un tiempo de vida media de unos 10^{-16} s se desintegra en dos fotones:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

Los piones cargados son más estables, ya que sus antiquarks no tienen el mismo sabor que los quarks y así no pueden aniquilarse mutuamente. Sin embargo, la fuerza débil puede cambiar el sabor de los quarks y dar lugar a la desintegración de los piones cargados. Al ser la fuerza muy débil, la desintegración es considerablemente más lenta (unos 10^{-8} s).

El producto final de la desintegración de un pión es otro mesón, pero éste no está compuesto de quarks. Se le denomina mesón mu o muon y se simboliza por μ. Al no tener quarks, no experimenta la fuerza nuclear fuerte. Está sometido a la fuerza débil (que es la responsable de su producción) y también está cargado eléctricamente. La aparición de μ viene acompañada por un nuevo tipo de neutrino, el llamado neutrino muónico, simbolizado por ν_μ:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

No hay muon neutro. Para distinguir a los neutrinos muónicos de los neutrinos asociados con la desintegración del neutrón, a estos últimos se les denomina neutrinos electrónicos y se los simboliza por ν_e.

Si dejamos de lado a los mesones, con sólo dos quarks que interaccionan fuertemente, u y d, y dos partículas que interaccionan débilmente, e y ν_e (más las cuatro antipartículas), podemos dar cuenta

de toda la materia ordinaria y, junto con los gluones, los fotones, los gravitones y las partículas *W* y *Z* (los mensajeros que intervienen en las cuatro fuerzas fundamentales), podemos explicar todas las características fundamentales de la interacción entre partículas. Si éstas fueran las únicas unidades fundamentales existentes, el mundo no sería probablemente muy distinto del que observamos.

Los tripletes de quarks constituyen las partículas pesadas (*n* y *p*), llamadas *bariones.* Las partículas *e* y ν_e son mucho más ligeras y se conocen con el nombre de *leptones.* Bastan dos bariones y dos leptones para constituir un mundo material muy semejante al que existe.

Sorprendentemente, la naturaleza parece haber producido una superabundancia de estructuras materiales, ya que el esquema de dos bariones y dos leptones se encuentra repetido al menos dos veces. A altas energías, donde se dispone de más energía para crear una mayor masa en reposo, aparecen dos nuevos tipos de quarks más pesados. A sus sabores se les designa caprichosamente como extraño y encantado, y se les simboliza por *s* y *c* respectivamente. Se combinan en tripletes para constituir nuevos bariones, más pesados que el protón y el neutrón, y en dobletes, dando lugar a mesones pesados. Los bariones extraños, es decir, los que contienen al menos un quark extraño, se simbolizan por Σ, Λ, Ξ y Ω. Todos ellos son inestables y se desintegran en menos de 10^{-8} s, dando lugar a partículas no extrañas. La primera partícula encantada que se descubrió, la partícula ψ tiene una masa tres veces mayor que la del protón y consiste en un par $c\bar{c}$. Se desintegra en menos de 10^{-20} s en piones y otras partículas. Junto a los quarks extraño y encantado está el muon, que es como un hermano mayor del electrón, y el neutrino muónico.

Se puede descubrir otro nivel a más altas energías. En él distinguimos dos nuevos quarks, cima y fondo, y un nuevo leptón pesado, el tau (τ), con una masa unas 3.500 veces la del electrón. Presumiblemente, τ tiene su correspondiente neutrino, ν_τ. El número de combinaciones de dos y tres quarks y sus antiquarks tomados de entre

seis sabores diferentes es elevado, de manera que el mundo de la materia subnuclear parece un zoo de diferentes especies de partículas.

La proliferación de quarks y de leptones se agudiza cuando se tiene en cuenta la fuerza que actúa entre los quarks. La teoría de mayor aceptación, que supone la existencia de gluones de ocho sabores, requiere de al menos tres tipos diferentes de carga "fuerte" para acoplar los gluones y los quarks, de la misma manera que la carga eléctrica acopla los electrones y los fotones. A la carga fuerte se la denomina, a falta de un nombre mejor, color. Así, los seis quarks conocidos pueden presentarse en tres colores diferentes, con lo cual tenemos un total de 18 tipos de quark. Los leptones, que no interactúan fuertemente, no tienen color. Las partículas formadas por quarks (es decir, los bariones y los mesones) están sujetas a la fuerza nuclear fuerte y se las conoce en conjunto con el nombre de *hadrones.*

Algunos físicos, en su continua búsqueda de la simplicidad en medio de tanta complejidad, se sienten impotentes ante el gran número de especies de quarks y ante la división de la materia en hadrones y leptones. De ahí que hayan propuesto que los mismos quarks están compuestos de unas nuevas y menores unidades (prequarks). Quizá también los leptones estén formados por prequarks. Tal vez esta secuencia de estructuras en el interior de otras estructuras no tenga fin y no haya realmente partículas elementales.

Nosotros supondremos que los quarks y los leptones son los componentes fundamentales de toda la materia, que son entidades carentes de estructura, sin partes internas, al menos en cuanto ello sea consistente con la gravedad cuántica (ver **apartado 2.2**). Es posible que se descubran nuevos sabores de quarks en el futuro, si bien ello representaría una mayor duplicación siempre molesta. Recopilamos estos detalles en la tabla 2.

Tabla 2. Las partículas elementales

	Quarks			Leptones	
	Sabor		Carga	Sabor	Carga
I	Arriba	*u*	+2/3	Electrón, *e*	–1
	Abajo	*d*	–1/3	Neutrino electrónico, ν_e	0
II	Encantado	c	+2/3	Muon, μ	–1
	Extraño	*s*	–1/3	Neutrino muónico, ν_μ	0
	Cima	*t*	+ 2/3	Tau, τ	–1
III	Fondo	*b*	–1/3	Neutrino de tau, ν_τ	0
	?		?	?	?

Toda la materia ordinaria está formada por sólo cuatro partículas elementales y sus correspondientes antipartículas, que no aparecen en la tabla (nivel I). Cada sabor de quark se presenta en tres colores diferentes. Por alguna razón, la naturaleza ha repetido este esquema al menos un par de veces (niveles II y III). Los leptones interactúan sólo de forma débil y normalmente permanecen aislados, pero los quarks están sometidos a la poderosa fuerza de los gluones y siempre se encuentran unidos en grupos de dos o tres. Estas combinaciones dan lugar a una enorme variedad de partículas subnucleares: protones, neutrones, mesones, Σs, Ψs, etc. Las partículas cuyos componentes pertenecen a los niveles II y III son muy inestables y se desintegran rápidamente en partículas del nivel I. Lo mismo ocurre con los leptones.
En este esquema no incluimos los fotones, gravitones, gluones y bosones vectoriales, es decir, las partículas mensajeras que transmiten las fuerzas entre los quarks y los leptones. La carga se mide en unidades de carga eléctrica del protón.

1.5 BREVE HISTORIA DEL UNIVERSO

La mayor parte de la cosmología moderna admite que el Universo surgió en una gran explosión, tal como esbozamos en el apartado **1.1**. La actual velocidad de expansión del Universo sugiere que la creación tuvo lugar hace entre 15 y 20 mil millones de años, cifra que viene confirmada por técnicas independientes de datación de las estrellas más viejas.

Al expandirse el Universo, toda radiación electromagnética que se propaga por el espacio se alarga, es decir, su longitud de onda, λ, aumenta y su frecuencia, v, disminuye. El efecto se manifiesta, por ejemplo, en un corrimiento hacia el extremo rojo del espectro de las líneas espectrales de las galaxias distantes, el famoso corrimiento hacia el rojo cosmológico.

Tal como señalamos en el **apartado 1.1**, a gran escala (mayor que el tamaño de un cúmulo de galaxias, es decir $\gtrsim 10^{23}$ m) el material cósmico está distribuido de manera extraordinariamente uniforme, y el ritmo de expansión es también uniforme en gran medida. El enigma fundamental de por qué esto es así será el tema central de capítulos posteriores. De momento señalemos simplemente que la expansión de un Universo que permanece homogéneo e isótropo puede ser descrita mediante un simple factor de escala, $a(t)$, que puede considerarse proporcional a la distancia entre dos cúmulos de galaxias típicas. A medida que el Universo se expande, $a(t)$ crece con el tiempo t.

La forma exacta de la función $a(t)$ depende de la dinámica del Universo a gran escala, dinámica que está controlada por la gravedad. (Discutiremos este punto con detalle en el **apartado 4.2**.) Por lo tanto, podemos utilizar la relatividad general para calcular la forma de $a(t)$. El resultado dependerá de qué término adoptemos como básico. Si suponemos que los efectos gravitatorios dominantes son los debidos a las galaxias, y si t no es demasiado grande, entonces:

$$a(t) \propto t^{2/3} \tag{1.16}$$

Por otro lado, si la masa–energía del Universo estuviera dominada por la radiación, entonces:

$$a(t) \propto t^{1/2} \tag{1.17}$$

En ambos casos se toma la condición inicial $a(t) = 0$, que corresponde a un origen singular de compresión infinita a $t = 0$. Las dos funciones tienen la misma forma general que la curva de la **figura 3**.

Ya hemos mencionado que el Universo se halla inmerso en un mar de radiación térmica cuya temperatura actual es de unos 3°K. Si λ es una longitud de onda típica, entonces $\lambda \propto a(t)$, de manera que la temperatura de la radiación disminuye a medida que el Universo se expande:

$$T \propto a^{-1}(t) \qquad (1.18)$$

La densidad de energía de la radiación electromagnética, que simbolizaremos por ϱ_γ, viene determinada por la ley de Stefan:

$$\varrho_\gamma = \sigma T^4,$$

de forma que

$$\varrho_\gamma \propto a^{-3}(t). \qquad (1.19)$$

σ es el símbolo de la llamada constante de radiación, que se expresa en términos de h, c y k en la **tabla 3**. No debe confundirse con el factor cosmológico de escala $a(t)$.

En cuanto a la densidad masa–energía de la materia tenemos que:

$$\varrho_m \propto a^{-3}(t) \qquad (1.20)$$

(ver **apartado 2.4**). Por lo tanto, cuando $a \rightarrow 0$, $\varrho_\gamma > \varrho_m$, de manera que el Universo estaba dominado por la energía de radiación en sus comienzos. Utilizaremos el símbolo t_{igual} para representar el tiempo en que $\varrho_\gamma = \varrho_m$. Podemos determinarlo por extrapolación utilizando las observaciones actuales de la relación entre las densidades de energía. Se observa que:

$$t_{\text{igual}} \sim 10^5 \text{ años.}$$

Adaptando la expresión (**1.17**) al tiempo $t < t_{\text{igual}}$ obtenemos que:

$$T \propto 1/t^{1/2}, \qquad (1.21)$$

de forma que la temperatura crece sin límite cuando $t \rightarrow 0$. Además, el ritmo de expansión es:

$$H \equiv \mathring{a} / a \propto 1/t, \qquad (1.22)$$

que también diverge cuando $t \rightarrow 0$. Así pues, el Universo primitivo tenía dos características fundamentales: temperaturas muy elevadas y una expansión explosiva. De ahí el nombre de gran explosión.

La constante de proporcionalidad en (**1.21**) depende de la estructura detallada del material cosmológico. Aproximadamente:

$$T \simeq 10^{10}\,°\text{K} / t_s^{1/2} \qquad (1.23)$$

donde t_s indica que el tiempo debe expresarse en segundos. La energía media de una partícula debida a la agitación térmica es kT, donde k es la constante de Boltzmann. Es evidente a medida que consideremos épocas más primitivas, la física del material cosmológico corresponderá a energías cada vez mayores. Los aceleradores de partículas actuales alcanzan energías del orden de las que debieron predominar en el Universo primitivo a $t \sim 10^{-12}$ s. La física de las épocas anteriores debe basarse fundamentalmente en puros argumentos teóricos.

Cuando la temperatura es suficientemente elevada, la energía térmica puede desencadenar la producción de pares partícula–antipartícula. Esto ocurrirá cuando $kT \gtrsim 2m_0c^2$. Así, antes de 1 s existían pares electrón–positrón; antes de 10^{-6} s pares protón–antiprotón, etc. En consecuencia, cerca del instante de la creación había una gran abundancia de todo tipo de partículas y antipartículas. Después, a medida que el Universo se expandía y enfriaba, las partículas y las

antipartículas se aniquilaron hasta desaparecer del Universo, originando gran cantidad de radiación electromagnética. Ésta es la radiación que, muy enfriada, está presente hoy día en forma de calor cósmico de fondo a 3°K.

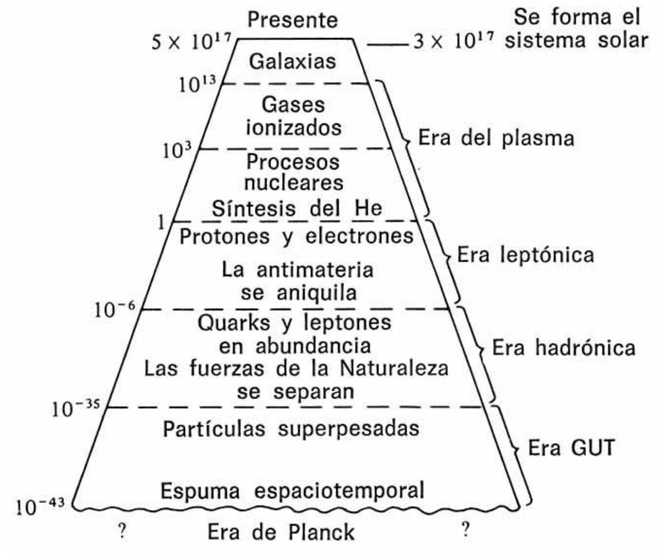


Fig. 6. Historia del Universo. Se indican las épocas más importantes (el tiempo se da en segundos). El primer momento que la teoría física puede describir de forma razonable es el tiempo de Planck, ~10^{-43} s después del instante inicial de la creación. La estructura actual del Universo, con sus fuerzas fundamentales y las partículas que constituyen la materia, "solidificó" en el horno ultracaliente del destello inicial de la existencia.

Evidentemente, la cantidad de antimateria presente en el Universo primitivo no podía ser exactamente igual a la cantidad de materia, ya que de serlo no hubiera quedado materia para formar las galaxias. El origen de este desequilibrio entre materia y antimateria es un tema que abordaremos en el **apartado 4.4**.

Así pues, el Universo primitivo puede caracterizarse por una sucesión de épocas (ver **fig. 6**). La primera duró 10^{-43} s. Entonces la edad del Universo era aproximadamente igual al tiempo de Planck. En este período los efectos cuánticos gravitatorios debieron ser importantes, ocasionando tal vez grandes distorsiones en la estructura del espacio-tiempo (ver el **apartado 2.2**). Dado que todavía no existe una teoría suficientemente fiable de la gravedad cuántica, no es posible realizar una investigación detallada de esta época, denominada era de Planck.

Al final de la era de Planck, la temperatura debía ser de unos 10^{32} °K y sólo existían los constituyentes elementales de la materia. La densidad era nada menos que de 10^{97} kg m^{-3}. A medida que la temperatura fue disminuyendo, los constituyentes fundamentales (¿los quarks?) dieron origen a los hadrones. Con el continuado descenso de la temperatura, la mayor parte de estos hadrones fueron aniquilándose, uno por uno, con sus antipartículas. De entre los que evitaron la aniquilación, la mayor parte sucumbieron víctimas de su inestabilidad.

Al cabo de un microsegundo, el material cosmológico primitivo estaba formado únicamente por las partículas más ligeras: protones, neutrones, electrones, muones, piones y sus antipartículas, así como neutrinos, fotones y gravitones. Las partículas más pesadas, como las formadas por los quarks extraños y encantados, ya habían desaparecido. Después de unos 10^{-6} s la temperatura era demasiado baja para mantener a los antiprotones y los antineutrones. Transcurridos 10^{-3} s se habían aniquilado los muones. Finalmente, al cabo de aproximadamente 1 s se habían aniquilado los positrones, quedando solamente neutrones, protones, electrones, neutrinos, fotones y gravitones.

La temperatura siguió decreciendo y la energía térmica descendió por debajo de la energía de unión de los núcleos compuestos, permitiendo la unión de neutrones y protones. Los cálculos indican que esta nucleosíntesis primitiva produjo alrededor del 25% en peso

de helio, siendo la materia restante básicamente protones libres (hidrógeno). A los pocos minutos, la temperatura era ya demasiado baja para que se produjeran más reacciones nucleares, y fue poco el material nuclear que, en el escaso tiempo disponible, consiguió agruparse y constituir núcleos más pesados.

El enfriamiento siguió su curso, pero su ritmo disminuyó con el tiempo ($dT/dt \propto t^{-3/2}$). Pasaron 10^5 años antes de que la temperatura alcanzara los 10^4 °K, momento en el cual kT cayó por debajo de la energía de ionización del hidrógeno y los protones y electrones libres se combinaron formando hidrógeno atómico. En esa época el material cosmológico se hizo transparente a la luz, de manera que a partir de entonces la materia y la radiación estuvieron básicamente desacopladas.

Con el tiempo, los gases en proceso de enfriamiento se agruparon formando protogalaxias. Las regiones de mayor densidad fueron atrayendo más materia, acrecentando así su poder gravitatorio. Estas protogalaxias se fueron contrayendo lentamente bajo su propia gravedad. Luego se fragmentaron una y otra vez hasta que cada fragmento individual llegó a tener el tamaño de una estrella muy dilatada. Dado que estos fragmentos se contraían en lugar de expandirse, la tendencia general del Universo a enfriarse quedaba compensada. La contracción del gas dio lugar a un progresivo calentamiento de los fragmentos, hasta que las temperaturas centrales se elevaron lo suficiente para que se iniciaran las reacciones nucleares (varios millones de grados). Con la producción de energía nuclear se detuvo la contracción, ya que el crecimiento de las presiones y temperaturas centrales consiguió equilibrar la compresión gravitatoria. Finalmente los fragmentos se estabilizaron, formando los objetos que hoy en día conocemos con el nombre de estrellas.

Una característica central del modelo cosmológico que acabamos de exponer es la suposición de equilibrio termodinámico. Sin ella, la descripción detallada de los procesos de la fase primitiva hubiera sido mucho más complicados. El equilibrio termodinámico implica

que el material cosmológico puede caracterizarse mediante un solo parámetro: la temperatura *T*. Pero, ¿es razonable esta suposición?

Las medidas de la radiación cósmica calorífica de fondo confirman que, con mucha aproximación, esta reliquia primigenia tiene un espectro de Planck, que es indicativo del equilibrio térmico (ver **fig. 7**). Sin embargo, esta radiación sólo lleva la huella de las condiciones cosmológicas a los 10^5 años, cuando la materia y la radiación se desacoplaron. ¿Qué podemos decir de las épocas anteriores?

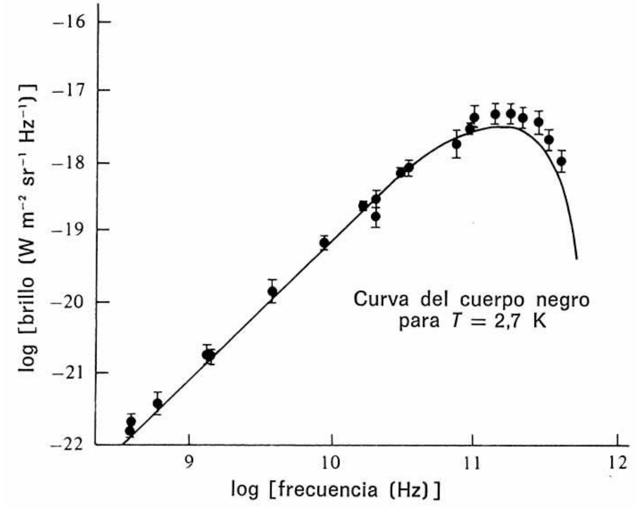


Fig. 7. El espectro de energía de la radiación del cuerpo negro tiene una forma característica. La curva es la gráfica calculada teóricamente que corresponde a una temperatura de 2,7 °K. Los puntos representan los resultados de diversas observaciones de la radiación cósmica de fondo en microondas.

Dado que el Universo primitivo estaba muy caliente y era muy denso, las diferentes partículas subatómicas debieron interactuar fuertemente unas con otras, impulsando el establecimiento del equilibrio. Por otra parte, las épocas primitivas fueron también las de

expansión más rápida, con lo cual se tendía a la rotura de este equilibrio. Como regla general, si el ritmo típico de reacción de algún proceso interactivo entre dos partículas fue mucho más rápido que el ritmo de expansión en una época determinada, entonces prevaleció el equilibrio. Los ritmos de reacción son proporcionales a la densidad numérica de cada clase de partícula. Por lo tanto, para partículas de igual abundancia, el ritmo es proporcional a a^{-6} y, en consecuencia, a t^{-3}. Por otra parte, el ritmo de expansión es $\dot{a}/a \propto t^{-1}$. Por consiguiente, y a menos que los otros factores que afectan a los ritmos de reacción dependan fuertemente de la temperatura —y por lo tanto del tiempo— (lo cual puede haber ocurrido en tiempos anteriores a 10^{-35} s), tenemos que cuando $t \rightarrow 0$ los ritmos de reacción son mayores que el ritmo de expansión.

Podemos aceptar, pues, que en el principio el material cosmológico estaba en condiciones de equilibrio termodinámico. Después, con la expansión continuada, los ritmos de reacción fueron disminuyendo y dejaron de ser comparables con el ritmo de expansión. De esta forma, las diferentes especies constitutivas del material cósmico fueron dejando de estar en equilibrio unas con otras. Para la mayor parte de estas especies tuvo lugar, en esta época, una gran actividad de aniquilación partícula–antipartícula.

Consideremos como ejemplo los electrones y los positrones. Antes de un segundo, aproximadamente, estas partículas estaban en equilibrio con la radiación electromagnética (fotones). Se producían aniquilaciones a un cierto ritmo (rápido), pero se creaban nuevos pares e^+, e^- a partir de la radiación calorífica con el mismo ritmo, manteniéndose las concentraciones de equilibrio de ambas especies:

$$e^+ + e^- \leftrightarrows 2\gamma$$

(equlibrio).

Cuando la temperatura descendió por debajo de unos 10^{10} °K, los fotones ya no tuvieron suficiente energía, por término medio, para

crear pares e^+, e^-. Así pues, en el proceso descrito se eliminó la flecha dirigida hacia la izquierda y las existencias de e^+, e^- se agotaron rápidamente sin posibilidad de ser restituidas. Tras un corto intervalo de tiempo solamente quedó un pequeño resto de electrones sobrantes.

En equilibrio termodinámico, la abundancia relativa de dos especies de partículas viene determinada por el teorema estadístico de Boltzmann. Si dos estados tienen energías E_1 y E_2, el teorema establece que las abundancias relativas correspondientes estarán en la proporción $\exp(-E_1/kT) : \exp(-E_2/kT)$. Si las partículas de una de las especies tienen una masa en reposo m_1, mientras que las de la otra especie tienen una masa en reposo m_2, entonces, dado que $E = mc^2$ y que, en equilibrio, estas partículas se crean al mismo ritmo con que se aniquilan, tenemos que la abundancia relativa de estas dos especies será $\exp[(m_2 - m_1)c^2/kT]$. Este "factor de Boltzmann" favorece por tanto a las partículas de menor masa:

$$\frac{\text{abundancia de la especie 1}}{\text{abundancia de la especie 2}} = exp\left[\frac{(m_2 - m_1)c^2}{kT}\right] > 1$$

si $m_2 > m_1$.

Un buen ejemplo es el de los protones y neutrones. Los neutrones son ligeramente más pesados, de manera que en el caliente Universo primitivo debieron ser menos abundantes. Ésta es la razón de que en la actualidad el Universo esté compuesto básicamente (alrededor de un 90%) por protones, principalmente en forma de hidrógeno. La relación neutrón–protón refleja las condiciones reinantes durante el primer segundo de la gran explosión.

La teoría general de la relatividad también hace predicciones sobre el futuro del Universo. Si examinamos la **figura 3** vemos que el ritmo de la expansión del Universo va disminuyendo gradualmente. Es fácil comprender la razón de esta deceleración. La gravedad de

las galaxias y de todo el material cósmico actúa como un freno a la expansión. Si este freno es suficientemente fuerte, conseguirá finalmente (a *t* muy grande) reducir la expansión a cero, tras lo cual se producirá una contracción y el Universo se desplomará sobre sí mismo a un ritmo acelerado. (Ignoramos aquí el efecto de la repulsión cósmica que discutimos en el **apartado 1.2**.) Al cabo de muchos miles de millones de años, las galaxias se aplastarán unas sobre otras y todo volumen de espacio se contraerá de forma catastrófica en una especie de “gran implosión” *(big crunch),* como la gran explosión *(big bang)* pero a la inversa. El resultado final de esta impresionante implosión es incierto, pero producirá no sólo la extinción de todas las estructuras físicas conocidas, sino también la aniquilación total del Universo, incluyendo el espacio y el tiempo. Este singular final del Cosmos sería un reflejo simétrico de su singular origen. En un modelo de este tipo, el Universo tiene una duración finita.

La condición necesaria para que la contracción tenga lugar es la presencia de suficiente material gravitatorio en el Universo. En otras palabras, depende de que la densidad de masa–energía sea lo bastante elevada para el ritmo de expansión dado. Según las observaciones actuales, la densidad de masa de las galaxias es algo menor que el valor crítico necesario para la contracción, pero es posible que la masa invisible (p. ej. en forma de neutrinos) compense el déficit. Discutiremos estas cuestiones con más detalle en el **capítulo 4**.

Si la gravedad del Universo no es capaz de detener la expansión, entonces es de esperar que el Universo continúe eternamente. Las estrellas acabarán explotando o consumiéndose, y se transformarán en enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros. A medida que las galaxias se oscurezcan, los agujeros negros irán tragando material —estrellas apagadas, gas y polvo, etc.— y creciendo. Procesos extraordinariamente lentos, tales como la emisión de radiación gravitatoria, causarán el deterioro orbital de muchos sistemas, de manera que las galaxias tenderán lentamente a despeñarse en los

agujeros negros. La materia que escape hacia el espacio intergaláctico acabará enfriándose hasta adquirir la temperatura ambiente de la radiación de fondo, que a su vez se irá enfriando según la ley (**1.18**).

Es posible que se produzcan otros efectos cuánticos más sutiles, y que los agujeros negros se evaporen lentamente, dejando tan sólo un residuo de radiación. Los protones del material que escape en el ocaso de un agujero negro podrán también desintegrarse finalmente en positrones (ver **apartado 4.4**), que comenzarán a aniquilarse con los electrones restantes. Que se produzca o no la aniquilación total depende de los detalles del modelo. En cualquier caso, el estado final de un Universo en expansión eterna parece ser un baño tenue y apagado de fotones, neutrinos, gravitones y tal vez unos cuantos electrones y positrones. A partir de entonces no ocurrirá nada de interés en toda la posterior eternidad.

2. Escalas de estructura

En el capítulo anterior hemos esbozado la jerarquía de las estructuras naturales. Curiosamente, las escalas de longitud y de tiempo más pequeñas (l_P y t_P) y las más grandes (t_H) vienen determinadas por la gravedad. Entre ambas están las estructuras dominadas por las fuerzas nucleares ($\lesssim 10^{-14}$ m) y electromagnéticas, que controlan todas las estructuras cuya escala de longitud se encuentra entre la atómica y la doméstica.

Si bien la naturaleza proporciona una enorme variedad de estructuras físicas, algunas de ellas se encuentran más o menos uniformemente por todo el Universo y tienen unas propiedades bastante bien definidas. Los átomos y las estrellas son buenos ejemplos. Los detalles específicos de cada sistema individual dependen de las leyes del movimiento y de las diferentes condiciones iniciales o de contorno que, en conjunto, especifican totalmente su comportamiento. Sin embargo, las características más generales —tamaño, masa, tiempo de vida, etc.— vienen determinadas a menudo, salvo un orden de magnitud, por los valores de constantes fundamentales, tales como G, *h, c, e* y m_p. Así, por ejemplo, los átomos cuya estructura depende del electromagnetismo y de la física cuántica, están básicamente moldeados por los parámetros *e* y *h* asociados con estas ramas de la física. Las estrellas, por otro lado, son objetos gravitatorios que cercan su energía electromagnéticamente: su estructura también depende de *G*.

En los próximos capítulos analizaremos los sistemas naturales más comunes desde este punto de vista tan general, con la esperanza de descubrir los parámetros que más afectan a su estructura. Veremos que con un número extraordinariamente pequeño de parámetros tales es posible dar una descripción bastante completa de la naturaleza.

2.1 EL PAPEL DE LAS CONSTANTES EN LA TEORÍA FÍSICA

La técnica de predecir las características esenciales de un sistema sin necesidad de apelar a la teoría completa de las leyes físicas se denomina a menudo “análisis dimensional”. Un ejemplo sencillo es el siguiente: ¿Cuál es el período de un péndulo?

Para abordar este problema debemos, en primer lugar, tratar de discernir qué magnitudes son importantes para el sistema que estamos considerando. Las oscilaciones de un péndulo en la superficie terrestre son inducidas por la gravedad de la Tierra, cuya intensidad puede caracterizarse mediante la magnitud g, la aceleración de un objeto en caída libre en la superficie de la Tierra (g = 9,81 m s^{-2}). Dos magnitudes parametrizan al péndulo propiamente dicho: la longitud y la masa. Dado que nos interesa el período del péndulo, precisamos una magnitud con unidades de tiempo. Si simbolizamos el tiempo por T, la longitud por L y la masa por M, g tiene unidades de LT^{-2}. Para combinar g con la longitud L del péndulo y la masa M y obtener una magnitud con unidades T, debemos tomar $(L/g)^{1/2}$; M no es necesaria. El resultado —que el período de un péndulo es $(L/g)^{1/2}$— no será correcto numéricamente, pero nos dará el valor real salvo un orden de magnitud. Esto lo confirma la teoría completa, que nos da $2\pi(L/g)^{1/2}$, valor del que el resultado obtenido a partir de argumentos dimensionales difiere en sólo aproximadamente un factor de 6. Para nuestros fines, los errores de este orden no son importantes.

Debemos distinguir entre aquellas magnitudes que son constantes simplemente porque no cambian, y las constantes universales fundamentales. La masa de la Tierra, por ejemplo, es aproximadamente constante, pero existen otros planetas con masas muy diferentes de la de la Tierra. Por otra parte, la masa de *todos* los electrones es la misma, independientemente del lugar que ocupen en el Universo. En el ejemplo del péndulo, ninguna de las dos magnitudes

importantes *L* y *g* es fundamental, lo cual simplemente refleja el hecho de que los péndulos pueden tener períodos de duración arbitrarios. Un péndulo no es una de aquellas estructuras que se encuentran en todo el Universo.

El número de constantes universales verdaderamente fundamentales que conocemos es, en realidad, muy pequeño. Ya hemos mencionado seis: c, e, h, G, g_W, g_S.

Otras constantes subatómicas universales son las masas de las diferentes partículas: ya hemos mencionado la del electrón. El problema que se presenta es que, en el estado actual de nuestros conocimientos, no sabemos cuáles son las partículas realmente fundamentales. Los neutrones aislados, por ejemplo, se desintegran en protones, electrones y antineutrinos. No debemos considerar al neutrón, ni a otras muchas partículas subnucleares inestables, como fundamental. Esta distinción debería otorgarse al electrón y a los quarks, pero las masas de los quarks independientes (que al parecer se presentan en al menos seis variedades distintas) están bastante indeterminadas. Además, es tan grande la atracción de un quark por otro que, al combinarse, liberan una fracción apreciable de su masa. Así pues, no podemos calcular a partir de la observación de un protón, por ejemplo, cuál es la masa de cada uno de sus quarks. Una complicación adicional proviene del hecho de que, según la mayoría de las teorías, la unión de los quarks es absolutamente irrompible; los quarks aislados son, entonces, una imposibilidad.

Si los quarks están confinados permanentemente en el interior de partículas como los protones, tiene más sentido considerar la masa de protón como una unidad fundamental, y no las masas de los quarks. Así pues, tomaremos m_e y m_P, las masas del electrón y del protón respectivamente, como dos unidades naturales básicas de masa, dado que éstas son las dos partículas estables de las que se compone toda la materia. Si las teorías recientes sobre la inestabilidad débil del protón son correctas, todavía existe una buena justificación para seguir considerando la masa del protón como una unidad

fundamental. El protón es, con mucho, la partícula pesada más estable.

Tabla 3. Lista de constantes fundamentales y de magnitudes derivadas

Nombre	**Símbolo**	**Valor numérico (Unidades SI)**
Carga del protón	e	$1{,}60\times10^{-19}$
Constante de Planck	h	$6{,}63\times10^{-34}$
Velocidad de la luz	c	$3{,}00\times10^{8}$
Constante gravitatoria de Newton	G	$6{,}67\times10^{-11}$
Masa en reposo del protón	M_P	$1{,}67\times10^{-27}$
Masa en reposo del electrón	m_e	$9{,}11\times10^{-31}$
Constante de la fuerza débil	$\mathrm{G_w}$	$1{,}43\times10^{-62}$
Constante de la fuerza fuerte	G_s	15
Constante de Hubble	H	2×10^{-18}
Constante cosmológica	Λ	$< 10^{-53}$
Relación cósmica fotón/protón	S	10^{9}
Permitividad del vacío	ε	$8{,}85\times10^{-12}$
Constante de Boltzmann	k	1.38×10^{-23}
Longitud de Planck $(G\hbar/c^3)^{1/2}$	l_P	$1{,}62\times10^{-35}$
Tiempo de Planck $(G\hbar/c^5)^{1/2}$	t_P	$5{,}39\times10^{-44}$
Masa de Planck $(\hbar c/G)^{1/2}$	m_P	$2{,}18\times10^{-8}$
Longitud de onda Compton del protón, $h/m_P c$	l_P	$1{,}32\times10^{-15}$
Tiempo de Compton del protón (nuclear), $h/m_P c^2$	t_N	$4{,}41\times10^{-24}$
Tiempo de Hubble, H^{-1}	t_H	$5{,}00\times10^{17}$
Radio de Hubble, cH^{-1}	r_H	$1{,}5\times10^{26}$
Radio de Bohr, $4\pi\varepsilon\hbar^2/m_e e^2$	a_0	$5{,}29\times10^{-11}$
Constante de radiación, $\pi^2K^4/15c^3\hbar^3$	σ	$7{,}56\times10^{-16}$
Constante electromagnética de estructura fina $e^2/4\pi\varepsilon\hbar c$	α	$7{,}30\times10^{-3}$
Constante débil de estructura fina, $g_W m_e^2 c/\hbar^3$	α_W	$3{,}05\times10^{-12}$
Constante gravitatoria de estructura fina $Gm_P^2/\hbar c$	α_G	$5{,}90\times10^{-39}$

Las constantes fundamentales de la naturaleza de esta lista determinan en gran medida las características esenciales de la mayor parte de las estructuras físicas conocidas. Muchas de estas características son notablemente sensibles a los valores de las constantes y a determinadas relaciones numéricas aparentemente accidentales entre ellas. Hay que señalar que H (y probablemente Λ) no son en realidad constantes, sino que varían a escalas de tiempo cosmológicas, y que k y ε son meros factores de conversión entre dos sistemas de unidades.

En la **tabla 3** damos la lista de todas las constantes universales que parecen necesarias para explicar las características fundamentales de la mayor parte de las estructuras físicas conocidas. También incluimos la constante de Boltzmann, *k*, que es un factor de conversión entre unidades de energía calorífica y temperatura.

Si el contenido de esta tabla ha de tener el significado universal que se le atribuye, es preciso verificar que tales magnitudes son realmente *constantes*. Si, por ejemplo, la carga de un protón variara de un lugar a otro, o de una época a otra, no la consideraríamos una magnitud fundamental. Sería necesaria alguna ley nueva que describiera estas variaciones, y esta ley presupondría, a su vez, sus propios parámetros fundamentales.

Se han llevado a cabo una gran variedad de experimentos para verificar "la constancia de las constantes". Podemos dividirlos en dos grupos: experimentos locales y observaciones cosmológicas. Los experimentos locales buscan restos de los efectos de la variación a escalas de tiempo geológicas. Por ejemplo, los cambios en g_S o en e se manifestarían en la estabilidad nuclear y en los tiempos de vida radiactivos de la desintegración α. Las variaciones en G afectarían a la luminosidad del Sol y al movimiento orbital de la Tierra, y es de esperar que dejaran vestigios en la historia geológica.

Las observaciones cosmológicas pueden sondear las variaciones tanto espaciales como temporales en la física, ya que las regiones lejanas del Universo las vemos hoy en la luz emitida hace miles de millones de años. Las variaciones en e o en m_e afectarían a los detalles de los espectros de las galaxias distantes. Los cambios en G producirían efectos perceptibles en la evolución de la estructura galáctica, etc.

Ninguno de estos detallados análisis nos ofrece datos indiscutibles en favor de ninguna variación en las constantes fundamentales. Algunos autores sostienen que hay indicios de la variación de G en menos de una parte en 10^{10} por año, pero los datos correspondientes admiten otras interpretaciones.

Hay tres excepciones: los parámetros cosmológicos H, Λ y S. Como ya hemos señalado, no se considera a H como una constante: H^{-1} es aproximadamente la edad del Universo. Se supone que, en la actualidad, el término cosmológico Λ varía extraordinariamente poco. Sin embargo, las variaciones en Λ pudieron haber sido muy importantes y significativas durante las primeras etapas del Universo. Discutiremos este tema más adelante en el **apartado 4.5.**

El cociente S no es constante, ya que, como es natural, continuamente se crean y se absorben fotones. Hay una acumulación sistemática del calor y la luz de las estrellas, por ejemplo. Sin embargo, el contenido de fotones primitivos del Universo es mucho mayor que el contenido correspondiente a la luz estelar, de manera que las variaciones en S, incluso en intervalos de tiempo cosmológicos, son pequeñas.

2.2 MICROESTRUCTURAS

En el próximo capítulo veremos cómo las escalas de las principales estructuras microscópicas del Universo están determinadas por las constantes de la **tabla 3**. La presentación de este capítulo y de los dos siguientes se basa en el artículo de Carr & Rees.

Estructura espumosa del espacio-tiempo

Las menores estructuras pronosticadas por la física actual aparecen en la longitud de Planck, $l_P \sim 10^{-35}$ m. Si bien la física de las dimensiones tan extraordinariamente pequeñas está más allá de cualquier posibilidad presente de acceso experimental, algunos modelos teóricos sugieren que a escalas $\sim l_P$ se requiere modificar profundamente los conceptos tradicionales de espacio y tiempo. El régimen de Planck está caracterizado por la importancia tanto de la gravedad como de la física cuántica. Como ya señalamos en el **apartado 1.3**,

la teoría general de la relatividad de Einstein describe la gravedad como una distorsión de la curvatura del espacio-tiempo. Una de las características fundamentales de la gravedad cuántica es que las partículas y los campos pueden sufrir fluctuaciones espontáneas de naturaleza aleatoria. Así, en el régimen de la gravedad cuántica —que se supone que adquiere importancia a escalas de longitud y tiempo de Planck— parece probable que se den violentas fluctuaciones en la curvatura del espacio-tiempo. En realidad, incluso es posible que la topología del espacio-tiempo sea muy compleja, con “túneles” y “puentes”. Se ha apuntado que el espacio-tiempo, que a menudo se compara con un liso lienzo sobre el cual se dibuja la actividad de la naturaleza, quizá se parezca más a una estructura esponjosa o espumosa, a estas pequeñísimas escalas de longitud y tiempo. También podemos imaginar que este espacio-tiempo está compuesto, por así decir, de agujeros negros del tamaño Planck empaquetados unos junto a otros.

Estas representaciones imaginarias no son más que una vaga y esquemática expresión de los abstractos conceptos que caracterizan a la teoría cuántica de la gravedad, una teoría todavía incompleta y, evidentemente, poco satisfactoria.

Núcleos

Los núcleos de los átomos constan de protones y neutrones unidos por la fuerza nuclear fuerte. Es de esperar, pues, que las masas de estas partículas y las características de la fuerza fuerte determinen el tamaño del núcleo. Las masas del protón y del neutrón difieren en menos de un 0,1%, de manera que podemos tratar la situación en términos de la masa m_P únicamente. Dado que el núcleo es un sistema cuántico, h jugará su papel. También, y dado que la fuerza nuclear es intensa, una fracción significativa de la masa (alrededor del 1%) se sacrificará como energía de unión, de manera que la relatividad también es importante.

Se pueden combinar las constantes m_P, h y c en una sola magnitud con unidades de longitud: la longitud de onda Compton del protón (ver **apartado 1.3**):

$$h/m_P c \sim 10^{-15} \text{ m}.$$

A menudo nos referimos a ella con el término de "tamaño del protón", si bien tal nombre es un tanto engañoso. Es más exacto decir que sería imposible localizar un protón en una región espacial menor que $h/m_P c$. La razón tiene que ver con el principio de incertidumbre de Heisenberg en la forma:

$$\Delta p \Delta x \sim h. \qquad (2.1)$$

Esta relación implica que si la posición x de una partícula está determinada en un campo de valores Δx, entonces su momento p tiene una incertidumbre de $\Delta p \sim h/\Delta x$. Así pues, si $\Delta x \sim 10^{-15}$ m, entonces Ap ~ 10^{-18} kg m s^{-1}. Un protón sólo alcanza este momento cuando se mueve casi a la velocidad de la luz. Entonces la energía cinética es tan grande que es suficiente para crear nuevas partículas:

$$\text{energía} \rightarrow p + \bar{p},$$

donde aparece un nuevo par protón–antiprotón. Si encerráramos al protón en el interior de una región de ~10^{-15} m, éste empezaría a engendrar otros protones idénticos (y antiprotones) y perdería su identidad original. Así, el tamaño del núcleo atómico debe ser mayor que la longitud de onda Compton del protón. En realidad, los núcleos atómicos pequeños no son mucho mayores.

Todavía no hemos dicho nada acerca del efecto de la fuerza nuclear que actúa entre los protones y los neutrones. Resulta que la magnitud de la fuerza nuclear, determinada por g_S, no es un parámetro pertinente para determinar el tamaño nuclear. Ello es así porque

las fuerzas nucleares solamente actúan entre los vecinos más próximos y, por tanto, presentan la propiedad de saturación: un núcleo con muchas partículas no está más estrechamente ligado que uno con pocas partículas. Cada partícula está unida solamente a sus vecinas próximas. En consecuencia, el tamaño del núcleo está determinado por el número total de partículas nucleares y por el alcance de la fuerza entre partículas individuales. Como ya señalamos en el **apartado 1.2**, la fuerza tiende rápidamente a cero más allá de unos 10^{-15} m, y en consecuencia el alcance, y por ende la separación media entre los protones y los neutrones, es en la práctica casi la misma que $h/m_P c$.

La razón de esta coincidencia se puede explicar mediante un modelo bastante sencillo del origen de las fuerzas nucleares, modelo que fue propuesto originalmente por Hideki Yukawa en los años 30. En este modelo se describe la fuerza que actúa entre las partículas nucleares en el lenguaje de los campos cuantizados, como ya explicamos en el **apartado 1.3**. La fuerza proviene del intercambio de partículas "mensajeras" entre los protones y los neutrones (ver **fig. 5**). Dado que la fuerza es de pequeño alcance, la masa de las partículas mensajeras debe ser muy grande, ya que el alcance es aproximadamente la longitud de onda Compton de las partículas mensajeras. La coincidencia anterior parece requerir la existencia de partículas mensajeras cuya masa en reposo no sea muy diferente de la de los protones. Pero esto es lo que sucede: podemos identificar los mensajeros con los mesones pi, que tienen masas de –0,1 m_P. La coincidencia no es, pues, más que el resultado de que los mensajeros de la fuerza nuclear y las partículas nucleares están constituidos por los mismos quarks.

Átomos y moléculas

Los átomos constituyen la siguiente escala de estructura. La nube de electrones está unida al núcleo por las fuerzas electromagnéticas,

de forma que es de esperar que el tamaño atómico venga determinado por *e, h* y m_e. Estas constantes pueden combinarse en una magnitud con unidades de longitud (el llamado radio de Bohr) de la siguiente forma:

$$a_0 = 4\pi\varepsilon\hbar^2/m_e e^2 \sim 10^{-10} \text{ m}, \quad (2.2)$$

y en una unidad de energía

$$E_{\text{átomo}} = m_e e^4/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2 \sim 10^{-18} \text{ J}. \quad (2.3)$$

Los cálculos exactos asignan, por ejemplo, una energía de $-m_e e^4/32\pi^2\varepsilon^2\hbar^2$ al estado de menor energía del átomo de hidrógeno. (El signo menos es la expresión del hecho de que un electrón está ligado en el átomo de hidrógeno, de forma que hay que gastar energía para arrancarlo.) Los experimentos confirman que el tamaño de los átomos es del orden de 10^{-10} m.

Las moléculas se forman gracias a los efectos electromagnéticos residuales que mantienen unidos los electrones a los núcleos. Estas fuerzas interatómicas son de alcance bastante corto, de manera que las estructuras moleculares formadas por un pequeño número de átomos tienen tamaños comparables a los de los propios átomos; es decir, las separaciones interatómicas no son mucho mayores que el tamaño de un átomo. Las uniones interatómicas debidas a estos efectos residuales son algo más débiles que las uniones atómicas. Aproximadamente

$$E_{\text{molécula}} \sim 0{,}1\, E_{\text{átomo}}. \quad (2.4)$$

2.3 MACROESTRUCTURAS

Cuerpos sólidos

Cuando consideramos la materia desde la perspectiva macroscópica, el parámetro fundamental es la temperatura, ya que ella determina que los cuerpos sean sólidos, líquidos o gaseosos. A temperatura T, la energía térmica media de una molécula es ~ kT, de forma que el requisito para la solidez es $kT \lesssim 0{,}1\ E_{\text{átomo}}$ si suponemos que la energía de unión molecular se debe aproximadamente al 10% de la energía de unión atómica. Utilizando (**2.3**) obtenemos $T \lesssim 10^4$ °K, de manera que nuestro Universo está lleno de oportunidades para los objetos sólidos, siendo como es su temperatura de fondo de sólo 3°K.

Cuando los átomos se agrupan masivamente, las fuerzas interatómicas son comparables a las energías de ligadura de los electrones periféricos, y en muchos casos, como en los cristales metálicos, es más exacto considerar que estos electrones periféricos están totalmente desligados de los átomos y que vagan libremente por el interior del material. En cualquier caso, las propiedades de rigidez de los materiales comunes de deben básicamente a estos electrones.

Que la materia macroscópica exista a una determinada densidad, se debe a un equilibrio de fuerzas. Las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias tienden a mantener unido al material, pero esta tendencia implosiva está contrarrestada por una presión dirigida hacia fuera que se debe, en el caso de los sólidos, al principio de exclusión de Pauli. Este principio establece que dos electrones no pueden ocupar el mismo estado, lo cual viene a significar que existe una especie de repulsión —independiente de la repulsión eléctrica— que intenta mantener a los electrones alejados unos de otros.

Tabla 4. Escalas de estructura

Sistema	Tamaño (m)	Característica estructural	Masa (kg)	Tiempo característico (s)
Gravedad cuantizada	10^{-35}	Estructura esponjosa del espacio-tiempo	10^{-8}	10^{-43}
Quarks, leptones	$<10^{-18}$	Partículas elementales sin estructura	?	$<10^{-26}$
Partículas nucleares	10^{-15}	Unión de quarks	10^{-27}	10^{-24}
Núcleo	10^{-14}	Unión de partículas nucleares	10^{-25}	10^{-23}
Átomo	10^{-10}	Núcleo y electrones	10^{-25}	10^{-16}
Molécula biológica	10^{-7}	Unión de átomos	10^{-20}	10^{3}
Célula viva	10^{-5}	Orden complejo	10^{-10}	10^{3}
Forma de vida avanzada	1	Organización inteligente	10^{2}	10^{9}
Ciudad	10^{4}	Orden social	10^{11}	10^{9}
Montaña, asteroide	10^{4}–10^{5}	Irregular	10^{12}–10^{13}	—
Planeta	10^{7}	Predominio gravitatorio	10^{24}	10^{4}
Estrella	10^{9}	Reacciones nucleares	$10^{3\circ}$	10^{17}
Sistema planetario	10^{11}	Estrella y planetas	$10^{3\circ}$	10^{8}
Cúmulo estelar	10^{18}	Ligado gravitatoriamente	10^{35}	10^{15}
Galaxia	10^{21}	Núcleo y brazos espirales	10^{41}	10^{16}
Cúmulo de galaxias	10^{23}	La mayor estructura conocida	10^{43}	10^{17}
Universo	10^{26}	Uniformidad	10^{53}	10^{18}

La tabla muestra los niveles principales de la jerarquía estructural de nuestro Universo. Los números están aproximados a la potencia de 10 más próxima. El tiempo característico representa la menor duración necesaria para que el sistema pueda transmitir información apreciable o sufrir cambios estructurales de importancia. En los cuatro primeros casos, éste es el tiempo que tarda la luz en atravesar el sistema. En los sistemas biológicos y sociales, es el tiempo de reproducción o de crecimiento. Para las estrellas se da el tiempo de vida medio, pero para otros sistemas ligados gravitatoriamente es más apropiado el tiempo de caída libre (aproximadamente el tiempo necesario para que el sistema implosione bajo su propia gravedad). Para el átomo es el tiempo orbital del electrón. En el caso del Universo, hemos dado su edad.

Para ilustrar el funcionamiento del principio de Pauli, consideremos un sencillo problema unidimensional. Supongamos que un electrón está confinado en el interior de una caja rígida de longitud L. De acuerdo con la teoría cuántica, el comportamiento del electrón se describe por una onda, cuya longitud de onda, λ, se relaciona con el momento, p, del electrón por la ecuación (**1.8**). Dado que el electrón

está estrictamente confinado en el interior de la caja, la amplitud de la onda es cero fuera de la caja, de forma que debe anularse en los extremos de la misma para que sea continua: no puede penetrar en la región exterior. La mayor longitud de onda, y en consecuencia el mínimo momento, se conseguirá cuando exactamente la mitad de una onda coincida con la longitud L, es decir, cuando $\lambda/2 = L$ (ver **fig. 8**). Un electrón en este estado "fundamental" tiene la mínima energía cinética posible $E = p^2/2m_e = h^2/8m_eL^2$.

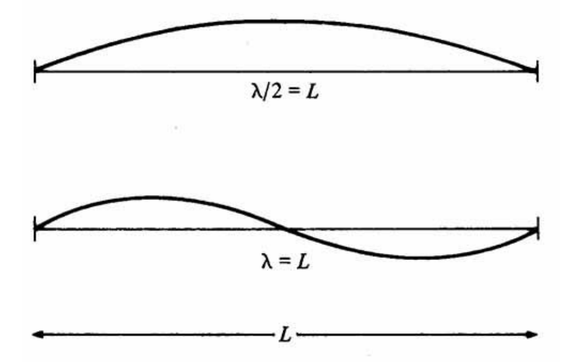


Fig. 8. Ondas en una caja. Este ejemplo unidimensional muestra como una onda confinada en una caja de longitud L solamente puede adoptar un conjunto discreto de longitudes de onda $\lambda = 2L$, $\lambda = L$, $\lambda = 3L/2$, etc. Por el principio de exclusión de Pauli, las ondas de los electrones en la caja deben ir adoptando cada una de estas configuraciones. No puede haber dos electrones con la misma forma de onda. (Ignoramos el *spin* de los electrones.)

Por el principio de Pauli, si colocamos un segundo electrón en la caja (ignoramos su repulsión eléctrica), éste no podrá alcanzar el estado fundamental. En su caso, la mínima energía posible corresponderá al primer estado excitado, que se alcanza cuando una onda entera encaja en la longitud L. Entonces $\lambda = L$ y $E = 4 \times (h^2/8m_eL^2)$. Continuando de este modo, los sucesivos electrones irán ocupando

niveles de energía cada vez más altos, con las correspondientes ondas de longitud cada vez menor. El electrón k–ésimo tendrá una energía cinética de $k^2h^2/8m_eL^2$.

Si el número total de electrones es N, podemos calcular la energía total sumando $k^2h^2/8m_eL^2$ para k desde 1 hasta N. El resultado es, para N grande, aproximadamente $N^3h^2/24m_eL^2$, de forma que la energía media por electrón es $N^3h^2/24m_eL^2$. Expresado en términos de la densidad numérica de electrones n (es decir, el número de electrones por unidad de longitud en este caso unidimensional) el principio de exclusión de Pauli supone una energía media por electrón de alrededor de $n^2\hbar^2/m_e$. Este efecto repulsivo se conoce normalmente con el nombre de *presión de degeneración* de los electrones.

Si pasamos a tres dimensiones el resultado es el mismo, con pequeñas diferencias en los factores numéricos. Ahora, sin embargo, si n es la densidad numérica de electrones por unidad de volumen, debemos reemplazar n^2 por $n^{2/3}$. Por lo tanto:

$$E_{\text{degeneración}} \sim n^{2/3}\hbar^2/m_e. \qquad (2.5)$$

En un cuerpo pequeño, donde la gravedad es despreciable, esta presión de degeneración estará contrarrestada por las fuerzas eléctricas de atracción entre los electrones y los núcleos positivamente cargados. Los dos efectos estarán equilibrados cuando la energía de atracción por electrón sea comparable con $E_{\text{degeneración}}$. En un volumen de material eléctricamente neutro, cada electrón estará acompañado por un número igual de cargas positivas nucleares. Si la separación media entre los electrones y los núcleos es del orden de a_0 —dado por la ecuación (**2.2**)—, entonces el valor de la energía electrostática por electrón será del orden de $e^2/4\pi\varepsilon a_0$, ya que cada par de cargas vecinas que se atraigan neutralizarán aproximadamente las fuerzas de cada una de ellas sobre las restantes partículas. Si la separación media es a_0, entonces el número total de electrones por unidad de volumen, n, es 1/do, de manera que podremos escribir:

$$E_{\text{eléctrica}} \sim e^2 n^{1/3}/4\pi\varepsilon. \qquad (2.6)$$

Igualando (**2.5**) y (**2.6**) obtenemos una densidad numérica de n = $e^6 m_e{}^3/64\pi^3\varepsilon^3\hbar^6$. Para convertir n en densidad de masa es preciso observar que la mayor parte de la masa de un sólido se debe a los núcleos, cuya densidad numérica también es n. Tomando la masa nuclear como unas cuantas veces m_P, e ignorando factores del orden de la unidad, tenemos que:

$$\text{densidad de masa} \sim e^6 m_0{}^3 \text{m}_P/64\pi^3\varepsilon^3\hbar^6 \sim m_P\,/a_0{}^3 \sim 10^3 \text{ kg m}^{-3}$$

que es un valor muy realista.

Planetas

Los cálculos anteriores deben modificarse si la masa del cuerpo que estudiamos es lo suficientemente grande para que la gravedad sea importante. Si bien las fuerzas gravitatorias que actúan entre los átomos son unas 40 potencias de 10 más débiles que los efectos eléctricos o de desintegración, la gravedad, al contrario que la electricidad, no se neutraliza por la proximidad de las partículas, sino que se acumula al aumentar el número de partículas N. En el caso de un cuerpo esférico de masa M y radio R, la energía gravitatoria es $\sim -GM^2/R \sim -GA^2 m_P{}^2 \text{N}^2/R$, donde A es el peso molecular del material. Para cuerpos sólidos grandes, tales como la Tierra, A puede ser muy grande, de forma que aquí lo incluimos explícitamente como un factor más. Esta energía se hace comparable con los efectos eléctricos y de degeneración cuando:

$$GA^2 m_P{}^2 \text{N}^2/R \sim Ne^2/4\pi\varepsilon a_0$$

o cuando

$$R \sim N a_0 A^2 (4\pi\varepsilon G m_P{}^2/e^2) \qquad (2.7)$$

La magnitud $4\pi\varepsilon G m_P{}^2/e^2$ es un número adimensional de importancia fundamental: es el cociente entre las fuerzas gravitatoria y electromagnética entre protones. Así como introdujimos la constante de estructura fina para el electromagnetismo (**1.11**), introduciremos ahora una constante de "estructura fina" gravitatoria definida por:

$$\alpha_G \equiv G m_p{}^2/\hbar c \simeq 5\times 10^{-39}. \qquad (2.8)$$

Este número adimensional fundamental aparecerá frecuentemente en los próximos capítulos. En términos de α y α_G (**2.7**), se convierte en:

$$R_{\text{planeta}} \sim (\alpha/\alpha_G)^{1/2} a_0/A, \qquad (2.9)$$

donde hemos utilizado el hecho de que $N \sim R^3/a_0{}^3$.

Para un objeto bastante denso, $A \simeq 50$, de forma que:

$$R_{\text{planeta}} \sim 10^7 \text{ m},$$

que es comparable al radio de la Tierra. En un cuerpo así, las fuerzas gravitatorias producirán modificaciones considerables en la estructura sólida del material, originando una compresión significativa y la licuefacción. Éste es, desde luego, el caso de la Tierra.

La aceleración debida a la gravedad en la superficie del cuerpo es:

$$g = GM/R^2. \qquad (2.10)$$

Si se forma un "chichón" (montaña) de altura H en la superficie, ejercerá una presión sobre su base que, si es suficientemente grande, fundirá el material subyacente, con lo que la montaña podrá hundirse. La energía potencial disponible es $\sim HAm_Pg$ por molécula, y si

esta energía constituye una fracción apreciable, digamos un 10%, de la energía de unión molecular del material de la base, entonces se producirá la licuefacción. Un cuerpo de estas características tenderá automáticamente a adoptar una forma esférica, como la Tierra. En consecuencia, la máxima altura posible de una montaña es:

$$H_{\text{máx}} \sim (10^{-2}e^4 m_e/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2)/(GMm_P A/R^2) \qquad (2.11)$$

$$\sim 10^{-2}(\alpha/\alpha_G)(a_0{}^2/A^2R),$$

donde hemos utilizado (**2.4**) y el hecho de que $M \sim Am_P R^3/a_0{}^3$. Sustituyendo $R = R_{\text{planeta}}$ en (**2.9**)

$$H_{\text{máx}} \sim 10^{-2}\, R_{\text{planeta}} \sim 10^5\,\text{m}, \qquad (2.12)$$

lo cual constituye una estimación muy razonable. La montaña más alta de la Tierra es aproximadamente $10^{-3}R_{\text{planeta}}$, que es evidentemente mucho menor que $H_{\text{máx}}$. La montaña más alta de Marte se acerca bastante a $H_{\text{máx}}$.

Un cuerpo podrá tener forma irregular si su masa es algo menor que la de un planeta. Las irregularidades serán grandes cuando la altura H de una "montaña" sea comparable con el radio medio R del cuerpo. Una estructura así sólo podrá mantenerse si $HAm_P g \lesssim 0{,}1\, E_{\text{molécula}}$. Utilizando (**2.4**) y (**2.10**) y poniendo $H \sim R$ obtenemos:

$$R \lesssim 0{,}1\, R_{\text{planeta}} \sim 10^6\,\text{m}.$$

Se conocen cuerpos en el Sistema Solar de forma irregular y tamaño menor que éste: los asteroides.

Estrellas

En nuestro análisis de los planetas despreciamos los efectos de la energía calorífica. Ahora bien, un cuerpo gravitatorio grande que

comprima el material central aumentará la temperatura interna; y si ésta alcanza los varios millones de grados, se iniciarán las reacciones nucleares y se alterará drásticamente la estructura del objeto. A estas temperaturas el cuerpo no será sólido, sino gaseoso, y las reacciones nucleares producirán mucha radiación. El objeto será una estrella.

Una esfera de gas de radio *R* estará en equilibrio si su propia gravedad se contrarresta por la combinación de esfuerzos de su presión térmica interna y de la presión de degeneración de sus electrones. Esto ocurrirá si la energía gravitatoria por partícula es comparable con la energía térmica *kT* más la energía de degeneración (2.5). Para el gas hidrógeno esto supone:

$$kT + N_*^{2/3}\hbar^2/m_eR^2 \sim GMm_P/R \sim Gm_P^2N_*/R, \qquad (2.13)$$

donde N_* es el número total de protones de la estrella.

Si la densidad es pequeña (*R* grande), el término R^{-2} es pequeño —la presión de degeneración es despreciable— de forma que la temperatura $T \propto R^{-1}$. Esto ocurre cuando se forma la estrella a partir de una nube de gas en lenta contracción. Más tarde, sin embargo, a medida que el radio disminuye el término de degeneración adquiere importancia, y la temperatura alcanza un máximo cuando:

$$GMm_P/R - N_*^{2/3}\hbar^2/m_eR^2$$

es también máximo. Esto ocurre si $R = 2\ \hbar^2Gm_P^2m_eN_*^{1/3}$, en cuyo caso la temperatura viene dada por:

$$kT_{\text{máx}} \sim (Gm_P^2/\hbar c)^2N_*^{4/3}m_ec^2. \qquad (2.14)$$

Para que el objeto se convierta en una estrella ordinaria, $T_{\text{máx}}$ debe ser suficiente para que se produzcan reacciones nucleares. La temperatura necesaria depende de los detalles de las fuerzas fuerte y electromagnética que forman la barrera de potencial nuclear que de-

ben atravesar los protones agitados térmicamente. De entrada, parece que sea necesario que $kT \sim 10m_e c^2$ (la energía liberada durante el proceso de fusión) pero en la práctica la penetración nuclear se puede producir a temperaturas mucho menores debido al efecto túnel cuántico y al hecho de que, a una temperatura dada, las energías de los distintos protones variarán ampliamente, de manera que algunos tendrán siempre una energía sustancialmente mayor que la media. En el **apartado 3.3** veremos que $kT \sim 10^{-2} m_P e^4/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2$.

Podemos utilizar esta información para calcular el mínimo número de protones de una estrella. De (**2.14**) y haciendo $kT_{máx} \sim 10^{-2} m_P e^4/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2$, se obtiene:

$$(10^{-2}\alpha^2 m_P/m_e)^{3/4}\alpha_G^{-3/2} \sim 0{,}1\ \alpha_G^{-3/2} \sim 10^{56} \qquad (2.15)$$

y un radio correspondiente de:

$$R_m \sim \alpha_G^{-1/2}\alpha a_0 \sim 10^{18} a_0 \sim 10^8 \text{ m}. \qquad (2.16)$$

El tamaño es comparable al de un planeta. Concluimos, pues, que no existe una división clara entre planetas grandes, como Júpiter, y estrellas pequeñas. En realidad, la temperatura central de Júpiter es probablemente de unos 25.000 °K.

En las estimaciones anteriores hemos ignorado los efectos de la radiación. ¿Es ello razonable? A temperatura T, la densidad de energía de radiación es σT^4, donde σ es la constante de radiación: $\sigma = 8\pi^5 k^4/15c^3\hbar^3$. La energía de radiación total en el interior de la estrella será de alrededor de $\sigma T^4 R^3$, que debemos comparar con la energía cinética de las partículas $\sim N_* kT$. Si ignoramos la presión de degeneración, entonces (**2.13**) nos da $kTR \sim Gm_P^2 N_*$ de forma que:

$$\sigma TR^3/N_* kT \sim \alpha_G^3 N_*^2,$$

que será del orden de la unidad cuando:

$$N_* \sim \alpha_G^{-3/2}.$$

Cuando N_* es mayor que este valor, la dinámica de la estrella estará dominada por la radiación, y es probable que ello dé lugar a inestabilidades tales como pulsaciones y una posible rotura. Así pues, consideramos $\alpha_G^{-3/2}$ como el valor máximo de N_*. Éste es sorprendentemente parecido al valor mínimo de N, dado por (**2.15**), y, en consecuencia, determina un intervalo bastante pequeño de valores admisibles en tomo a $\alpha_G^{-3/2} \sim 10^{57}$. A partir de estas ideas elementales podemos concluir que el número de partículas contenidas en una estrella típica viene dada por una fórmula extraordinariamente sencilla:

$$N_* \sim \alpha_G^{-3/2} \qquad (2.17)$$

La masa viene dada aproximadamente por:

$$M_* \sim N_* m_P \sim \alpha_G^{-3/2} m_P. \qquad (2.18)$$

Cualesquiera que sean las condiciones en el interior de la estrella, lo que nosotros vemos en realidad es su superficie. El parámetro más importante de la misma es la luminosidad, L, definida como el flujo de energía liberada en forma de radiación por unidad de tiempo. Si la estrella se encuentra en equilibrio estable, es evidente que el ritmo de pérdida de energía en la superficie está exactamente equilibrado por el ritmo de generación de energía en el interior. Este último viene determinado por la temperatura central, T_C, que controla el ritmo de combustión nuclear en el núcleo de la estrella. La temperatura del núcleo es mayor que la de la superficie, pero podemos estimar la magnitud del contenido total de energía radiante de la estrella haciendo $T = T_C$ en la fórmula o$T^4 R^3$ que hemos utilizado. Entonces la luminosidad viene dada por el contenido de energía multiplicado por el ritmo de desplazamiento de la energía hacia las capas exteriores de la estrella. En lenguaje cuántico, esto equivale a la energía de todos los fotones de la estrella dividida por el tiempo de difusión de los fotones en el interior de la estrella.

Los fotones producidos en el núcleo no atraviesan fácilmente el material estelar, que es muy opaco. En realidad, recorren una distancia muy corta antes de ser dispersados por un ion o un electrón. En el caso de las estrellas no excesivamente grandes, esta opacidad está causada fundamentalmente por la dispersión por electrones libres. Si ignoramos el retroceso de los electrones (la energía de los fotones es relativamente pequeña en las capas exteriores de la estrella, donde se encuentra la mayor parte del material) entonces la sección eficaz de dispersión viene dada por la fórmula de Thomson:

$$\Sigma = e^4/16\pi^2\varepsilon^2 m_e{}^2 c^4 \qquad (2.19)$$

La distancia media recorrida por un fotón cualquiera antes de ser dispersado es:

$$\bar{\iota} \simeq 1/n^e\Sigma \qquad (2.20)$$

donde n_e es la densidad numérica media de electrones, que será aproximadamente igual a la densidad media de protones, es decir N/R^3. Así pues,

$$\bar{\iota} \sim 16\pi^2\varepsilon^2 m_e{}^2 c^4 R^3/Ne^4. \qquad (2.21)$$

Si el fotón pudiera escapar libremente, tardaría un tiempo R/c en llegar a la superficie. En la práctica, y debido a la interacción con los electrones, el fotón recorre un camino aleatorio en el interior de la estrella y llega a la superficie por casualidad. El tiempo de escape aumenta en un factor $R/\bar{\iota}$. La luminosidad es, pues,

$$L \sim [\sigma T_C{}^4 R^3] \,/\, [(R/c)(R/\bar{\iota})]$$

Normalmente esto se expresa en términos de la opacidad del material estelar, definida como $\aleph \equiv (\bar{\iota} \times \text{densidad de masa})^{-1}$. Dado que la densidad de masa es $\sim M/R^3$, se tiene que:

$$L \sim \sigma c T_C{}^4 R^4 / \aleph M, \qquad (2.22)$$

que es en realidad: (cantidad total de energía radiante disponible) / (tiempo que tarda la energía en escapar de la estrella).

Otra caracterización de L se obtiene observando que, como ya hemos indicado, la densidad de energía de radiación de una estrella típica no es muy diferente de la energía térmica de las partículas. Si despreciamos los efectos de degeneración, la ecuación (**2.13**) nos indica que la energía de agitación térmica kT es aproximadamente la misma que la energía de unión gravitatoria por partícula. Si combinamos estas dos igualdades aproximadas obtenemos que la energía de radiación total ~ energía de unión gravitatoria total, es decir:

$$\sigma T_C{}^4 R^3 \sim GM^2/R. \qquad (2.23)$$

Si utilizamos (**2.23**) para eliminar $\sigma T_C{}^4$ de (**2.22**), llegamos a la llamada luminosidad de Eddington:

$$L \sim GMc / \aleph \qquad (2.24)$$

Es conveniente para nuestros propósitos determinar explícitamente la dependencia de L de la carga eléctrica e. Utilizaremos, pues (**2.21**) para eliminar $\aleph$ de (**2.22**) y (**2.24**). Las dos expresiones para la luminosidad son entonces:

$$L \sim 16\pi^2 \varepsilon^2 \sigma T_C{}^4 R^4 m_e{}^2 c^5 / Ne^4 \qquad (2.25)$$

y

$$L \sim 16\pi^2 \varepsilon^2 GMm_P m_e{}^2 c^5 / e^4 \qquad (2.26)$$

respectivamente.

Otra característica importante de una estrella es su tiempo de vida. Una inspección poco profunda del firmamento nos hace pensar

que el Universo es estático e inmutable. Con la excepción de las novas o las variables, parece que las estrellas no cambian de un siglo a otro. El Sol, en particular, ha permanecido estable, con poco cambio de luminosidad, durante más de cuatro mil millones de años. Esto lo sabemos porque existen vestigios de vida en la Tierra de más de 3 mil millones de años de antigüedad. La Tierra ha tenido océanos líquidos durante la mayor parte de la historia del Sistema Solar, y esto impone unas restricciones muy severas sobre la temperatura y la variabilidad de la luminosidad del Sol.

El hecho de que vivamos en un entorno estable de tal longevidad es consecuencia de que el Sol quema su combustible de hidrógeno con relativa lentitud. Cuando se acabe este combustible (dentro de unos 5 mil millones de años) el Sol iniciará un período errático y acabará hundiéndose y transformándose en una enana blanca porque las reacciones nucleares ya no podrán mantenerlo. Algo similar ocurre con la mayor parte de estrellas.

El ritmo de consumo del combustible nuclear en el interior de la estrella depende de la luminosidad de la misma, que a su vez depende de la intensidad de la gravedad (a través de G) y del electromagnetismo (a través de la opacidad del material estelar, y por tanto de e). El tiempo de vida de una estrella viene dado, de forma aproximada, por el cociente entre las reservas totales de energía y el ritmo de consumo de la misma, L. La reserva de energía se puede calcular teniendo en cuenta que la fusión del hidrógeno para formar elementos más pesados —la fuente del calor estelar— libera alrededor del 1% de la masa en reposo de cada protón. Si todo el hidrógeno de la estrella se consume de esta forma se liberará alrededor de $10^{-2} Mc^2$. Utilizando (**2.26**) se obtiene que el tiempo de vida de la estrella será aproximadamente:

$$t_* \sim 10^{-2} e^4 / 16\pi^2 \varepsilon^2 G m_e^2 m_P c^3.$$

Podemos expresar esta relación en forma más conveniente en términos de la escala de tiempo nuclear, $t_N \sim h/m_P c^2$:

$$t_* \sim [10^{-2}\alpha^2(m_P/m_e)^2]t_N\alpha_G^{-1} \qquad (2.27)$$

La magnitud entre corchetes es del orden de la unidad, de forma que:

$$t_* \sim \alpha_G^{-1}t_N \sim 10^{40}t_N. \qquad (2.28)$$

De nuevo nos encontramos con el número “mágico” $\sim 10^{40}$. Si recordamos las expresiones (**1.15**) podemos escribir:

$$t_*/t_P \sim (t_N/t_P)^3. \qquad (2.29)$$

Vemos, además, que:

$$t_* \sim t_H, \qquad (2.30)$$

que nos dice que el tiempo de vida de una estrella típica es comparable a la edad actual del Universo, lo cual es correcto. Utilizando (**2.18**) se obtiene otra relación más:

$$M_*/m_P \sim t_*/t_P. \qquad (2.31)$$

A partir de la discusión anterior es evidente que si la gravedad fuera más intensa las estrellas se consumirían más rápidamente. El incremento de G en un factor 10 alteraría totalmente la estructura del Sistema Solar en la escala de tiempo de su historia presente. La Tierra, por ejemplo, ya no existiría; se habría vaporizado al acercarse el Sol a su fase de gigante roja tras consumir todo su hidrógeno.

La extrema debilidad de la gravedad es una característica muy notable de la naturaleza. La gravedad en el interior de un átomo de hidrógeno es cerca de 10^{40} veces más débil que el electromagnetismo; éste es un número que, como vemos, tiene una influencia directa sobre el tiempo de vida de la estrella. En resumen, las enormes escalas de tiempo necesarias para que se produzcan grandes cambios cósmicos son directamente atribuibles a la debilidad de la gravedad.

2.4 ESTRUCTURA CÓSMICA

Las estructuras más notables por encima de la escala estelar son las galaxias. La Vía Láctea, con unas 10^{11} estrellas de masa comparable a la del Sol, $M_\odot$, es una galaxia típica. Como ya observamos en el apartado 1.1, las mismas galaxias se agrupan en cúmulos con masas totales del orden de 10^{14} $M_\odot$ y tamaños del orden de 10^{23} m.

Contrariamente a lo que ocurría con las estructuras consideradas en los **apartados 2.2** y **2.3**, no parece posible explicar los tamaños y las masas de las galaxias y de los cúmulos de galaxias apelando solamente a las constantes físicas. Cuando se propuso por primera vez la teoría del *Big Bang*, se esperaba poder explicar la existencia de las galaxias de la siguiente manera. Se suponía que los gases primitivos originados en el *Big Bang* estaban distribuidos uniformemente por todo el espacio. A medida que el Universo se expandía, la densidad local del gas disminuía sistemáticamente.

En distintas partes de este material gaseoso caliente, las fluctuaciones estadísticas producirían diferencias de densidad debidas simplemente a perturbaciones aleatorias en la distribución uniforme del gas. Las regiones de mayor densidad ejercerían entonces una atracción gravitatoria ligeramente mayor sobre el resto del material, creándose así una tendencia a acumular más material circundante. Esta tendencia se haría más intensa con el transcurso del tiempo. A la larga podrían formarse las galaxias.

El crecimiento de las regiones de mayor densidad debe competir con la omnipresente expansión cosmológica. La expansión intenta reducir la densidad del gas, mientras que la perturbación de densidad intenta frenar la expansión local. El resultado de esta competición es que las regiones más densas crecen muy lentamente, demasiado lentamente para dar razón de la existencia de galaxias en el tiempo disponible desde la creación.

Una forma de evitar este problema es suponer que ya desde el principio había irregularidades considerables que sólo precisaron de

un modesto apoyo durante la expansión posterior. Con esto se explica, sin duda, la existencia de las galaxias, pero antes debemos aceptar la presencia original de unas irregularidades adecuadas, de tamaño apropiado, de densidad suficiente para producir galaxias, pero no tan grande como para dar lugar al desplome gravitatorio total de los agujeros negros. Esta explicación de las galaxias y los cúmulos galácticos descansa más en las *condiciones iniciales* que en las constantes fundamentales. Si estas condiciones hubieran sido diferentes en tamaño o en el grado de irregularidad, la organización del Cosmos a gran escala sería totalmente distinta.

Es necesario destacar que se ha buscado el origen de las perturbaciones de densidad en los detalles del material cosmológico de épocas muy primitivas (<1 s). Se han propuesto muchos mecanismos que apelan a fuerzas diferentes de la gravedad. Es concebible que los procesos hadrónicos anteriores a 10^{-6} s dieran origen al agrupamiento de la materia en conglomerados de masa galáctica. Desgraciadamente, estas épocas primitivas son tan poco conocidas que todo intento de explicación del origen de las galaxias basado en la física de estos períodos descansa fundamentalmente en suposiciones. Nos ocuparemos de este tema con más detalle en el próximo capítulo.

La mayor escala de estructura es, desde luego, el Universo mismo. Como vimos en los **apartados 1.1** y **1.5**, el alto grado de uniformidad cósmica a gran escala permite caracterizar el comportamiento global del Universo mediante un simple factor de escala $a(t)$. A partir de este parámetro se puede construir una escala de tiempo característica, el tiempo de Hubble $t_H \equiv a/\mathring{a}$, comparable a la edad del Universo.

Otro parámetro dinámico interesante es el ritmo de deceleración de la expansión del Universo. Como ya explicamos en el capítulo 1, esta deceleración es producida por el efecto gravitatorio de todas las galaxias y el resto del material cósmico. En consecuencia, su magnitud depende de la naturaleza de los cuerpos gravitatorios. Para la

materia ordinaria se aplica la función (**1.16**), mientras que en un Universo dominado por la radiación es más apropiada (**1.17**). En el capítulo 4 analizaremos más detalladamente la dinámica cósmica y veremos que también hay otras consideraciones que pueden afectar a la forma de *a(t)*.

Cualesquiera que sean los efectos a tener en cuenta para determinar *a(t)*, la deceleración real puede ser descrita por el parámetro:

$$q = -\bar{a}a/\mathring{a}^2 \qquad (2.32)$$

que toma los valores 1/2 y 1 en los casos (**1.16**) y (**1.17**) respectivamente.

La influencia gravitatoria del material cósmico, que determina parcialmente *q*, se puede expresar en términos de la densidad de energía, ╞, de las distintas contribuciones. De las observaciones actuales se sigue que, para la materia y la radiación electromagnética respectivamente,

$$\varrho_m \simeq 10^{-11}\ \mathrm{J\ m^{-3}} \qquad (2.33)$$

$$\varrho_\gamma \simeq 10^{-14}\ \mathrm{J\ m^{-3}}, \qquad (2.34)$$

valores que varían con el tiempo según (**1.19**) y (**1.20**). La densidad de energía de la materia (**2.33**), hace referencia a la energía de la masa en reposo, que es la contribución dominante en nuestra época. Es posible que la estimación realizada deba ser revisada al alza a la luz de algunos resultados experimentales recientes sobre neutrinos (ver **apartado 3.1**).

El cociente ϱ_Γ/ϱ_m varía del mismo modo que $a^{-1}(t)$. Esto es así ya que ϱ_Γ experimenta una reducción adicional con respecto a ϱ_m al expandirse el Universo, debido al corrimiento hacia el rojo. Obtenemos una relación radiación/materia mucho más significativa si exa-

minamos la densidad de partículas en lugar de la densidad de energía. En el caso de la materia no relativista, ϱ_m es proporcional a la densidad de partículas. Dado que la mayor parte del material cósmico está en forma de hidrógeno:

$$\varrho_m \simeq m_P n_P \propto a^{-3}, \qquad (2.35)$$

donde n_P es la densidad numérica de protones.

Por otro lado:

$$\varrho_v \simeq n_\gamma h_v \qquad (2.36)$$

donde n_γ es la densidad de fotones y h_v es la energía de un fotón típico (ver **ecuación 1.7**). A medida que el Universo se expande, la longitud de onda de la radiación también aumenta en un factor *a(t),* y en consecuencia $v \propto a^{-1}$. Observando que $\varrho_\Gamma \propto a^{-4}$, se obtiene a partir de (**2.36**):

$$n_\gamma \propto a^{-3}. \qquad (2.37)$$

Así pues, n_γ/n_P es constante, no depende del tiempo. Es un cociente fundamental adimensional de gran importancia para la cosmología, que a veces se denota por *S*. De (**2.33**) y (**2.34**) se sigue que:

$$S \equiv n_\gamma/n_P \sim 10^9. \qquad (2.38)$$

Si bien S es específicamente la razón fotón/protón, hay sin duda más contribuciones (gravitones, neutrinos) al contenido de radiación del Universo. La mayor parte de los cosmólogos creen que éstas son comparables al contenido de fotones (ver **apartado 4.4**).

Otra forma de parametrizar la ecuación (**2.33**) es tomar una unidad natural de volumen y definir un número de partículas en lugar de una densidad. Una escala de distancia cósmica natural nos la da ct_H, la distancia que recorre la luz en un tiempo de Hubble. Como

esta distancia es aproximadamente la que ha recorrido la luz desde la creación del Universo, representa una especie de tamaño máximo presente de la parte del Universo que podemos, incluso en principio, observar. El número de protones que hay dentro de este radio de Hubble es, usando (**2.33**),

$$N \sim 10^{80}.$$

No es un número mucho menor que el número total de bariones (protones y neutrones), o incluso que el número total de bariones más electrones. Obsérvese que N es el *cuadrado* del omnipresente número 10^{40}, una sorprendente coincidencia que discutiremos en el **capítulo 4**.

Los cuatro parámetros H, q, S y N caracterizan la estructura del Universo a gran escala. Sus valores están en parte determinados por las condiciones iniciales del Cosmos en el instante de su creación. En los próximos apartados del libro veremos que la estructura del Universo es muy sensible a los valores que toman estos números.

3. Un frágil equilibrio

En el capítulo anterior hemos visto que la estructura general de muchos de los sistemas que observamos en la naturaleza está determinada por un número relativamente pequeño de constantes universales. Si los valores numéricos de estas constantes fueran diferentes de los observados, la estructura de estos sistemas seria también distinta. Lo que tiene un interés especial es que, en muchos casos, una pequeña alteración de los valores produciría una reestructuración drástica del sistema en cuestión. Es evidente que la particular organización del mundo que nosotros percibimos se debe a un "ajuste" muy preciso de estos valores. En este capítulo y el siguiente examinaremos algunos de los ejemplos más sorprendentes.

3.1 NEUTRINOS

Los objetos omnipresentes por excelencia en el Universo son los neutrinos. Según la teoría, el *Big Bang* produjo $\sim 10^9$ neutrinos por cada protón y electrón, y estos neutrinos bañan el Universo en la actualidad. Pero los neutrinos interactúan de forma extraordinariamente débil con la materia ordinaria. La Tierra, por ejemplo, es casi totalmente transparente a ellos. De ahí que la creencia de que el Universo contiene una inmensa cantidad de neutrinos cósmicos no puede verificarse experimentalmente en la Tierra.

Debido al enorme número de neutrinos, la estructura del Universo a gran escala es muy sensible a sus propiedades. Hasta hace poco se creía que los neutrinos no tenían masa y que, por tanto, viajaban a la velocidad de la luz. En 1980, varios experimentos pusieron de manifiesto que esta suposición tan antigua era probablemente falsa. Según los primeros resultados, el neutrino podría tener una

masa en reposo de unos 5×10^{-35} kg, unas 5×10^{-5} veces la masa del electrón.

En realidad la situación es un poco más complicada, ya que se sabe que existe más de una clase de neutrinos. Los físicos de partículas consideran en la actualidad tres clases o “sabores” de neutrinos (ver **apartado 1.4**). Una de las sorpresas de los recientes experimentos es que, aparentemente, un neutrino puede cambiar de sabor mientras se mueve, pasando rápidamente de una de las tres clases a otra. Este fenómeno de oscilación está muy relacionado con la suposición de que la masa del neutrino, al menos la del neutrino electrónico, es no nula.

Si bien una masa de 5×10^{-35} kg es extremadamente pequeña comparada con el resto de las partículas conocidas, la elevada densidad de neutrinos en el Universo (unos 10^9 m^{-3}) implica que la masa total acumulada de neutrinos podría superar la de todas las estrellas. En realidad, si la masa del neutrino fuera de, por ejemplo, 5×10^{-34} kg, entonces la fuerza gravitatoria del sustrato primitivo hubiera originado una alteración drástica en la expansión del Universo, deteniéndola incluso completamente antes de la época actual. Es, por tanto, importante darse cuenta de que un cambio aparentemente insignificante en una masa tan minúscula podría hacer que viviéramos en un Universo en *contracción* en lugar de uno en expansión.

Una masa neutrínica ligeramente mayor tendría también otras consecuencias. La temperatura actual del sustrato de neutrinos es de unos 2°K; esto significa que, si su masa es apreciable, la mayor parte de los neutrinos cósmicos serán no relativistas, y de hecho tendrán velocidades menores que la de escape de los cúmulos de galaxias. En consecuencia, tenderán a acumularse en las proximidades del centro de estos cúmulos, constituyendo el medio a través del cual se desplazan las galaxias en sus movimientos orbitales dentro del grupo y en sus rotaciones internas. Si bien las estrellas y el gas apenas interactúan directamente con los neutrinos mediante la fuerza débil, los neutrinos pueden actuar gravitatoriamente sobre las galaxias.

Ello da lugar a una especie de viscosidad en el movimiento galáctico. Los cálculos de un equipo de físicos teóricos de la Universidad de Texas en Austin indican que la estructura galáctica que observamos se vería amenazada por el sustrato neutrínico si la masa del neutrino fuera un poco mayor que la citada. Es evidente que incluso un mínimo incremento en la masa del neutrino originaría cambios radicales en la estructura galáctica.

Es preciso señalar, no obstante, que si la masa del neutrino fuera muy grande (comparable por ejemplo a la del protón), los neutrinos primigenios no hubieran sido tan abundantes. Esto se sigue del teorema de Boltzmann, que favorece la distribución de energía entre las partículas menos pesadas (ver **página 44**). En este caso, el sustrato cósmico de neutrinos perdería su importancia.

Es también digno de observar la extraordinaria debilidad de la interacción entre los neutrinos y la materia ordinaria. Esta interacción, bien que minúscula, tiene una gran importancia cosmológica. En la fase primitiva del Universo, antes de que hubiera transcurrido el primer segundo, la temperatura superaba los 10^{10} K, y el material cosmológico contenía gran cantidad de positrones (ver **apartado 1.5**). La interacción de los neutrinos y antineutrinos con los electrones, positrones, neutrones y protones originó los siguientes procesos:

$$p + e^{-} \leftrightarrow n + \nu, \qquad p + \bar{\nu} \leftrightarrow n + e^{+},$$

lo cual permitió que los protones y los neutrones se transformaran unos en otros. Mientras el ritmo de estas reacciones fue apreciablemente mayor que el ritmo de expansión cósmica, pudo mantenerse un equilibrio termodinámico entre los neutrones y los protones.

Como ya explicamos en el **apartado 1.5**, en condiciones de equilibrio la relación entre las abundancias de neutrones y protones viene determinada por el factor de Boltzmann, $\exp(-\Delta mc^2/kT)$, donde Δm es el exceso de masa del neutrón con respecto al protón. A medida

que el Universo se expandía, el ritmo de expansión disminuía sistemáticamente. También descendieron los ritmos de reacción, dado que el Universo se enfrió y disminuyó la densidad de las partículas. Las reacciones mencionadas se hicieron cada vez más lentas, hasta que finalmente descendieron por debajo del ritmo de expansión. Entonces se destruyó el equilibrio termodinámico y la relación entre las abundancias quedó fijada.

La temperatura, T_F, a la cual se destruyó el equilibrio se determina igualando el ritmo de expansión cósmica $(\dot{a}/a)$ al ritmo de las reacciones antes citadas. En el próximo capítulo veremos que, en el Universo primitivo, el ritmo de expansión era:

$$\mathring{a}/a \simeq (8\pi G\varrho/3c^2)^{1/2}, \qquad (3.1)$$

donde ϱ es la densidad total de energía del material cosmológico, dominado en aquella época por la radiación. En consecuencia, podemos utilizar la ley de Stefan para ϱ, con un factor numérico apropiado que represente las contribuciones de las diferentes clases de radiación. Este factor será del orden de la unidad. Sustituyendo explícitamente la constante de radiación, obtenemos en lugar de (**3.1**):

$$\mathring{a}/a \sim (Gk^4T^4/\hbar^3c^7)^{1/2}. \qquad (3.2)$$

Volviendo al ritmo de transmutación entre el protón y el neutrón, éste vendrá determinado por la magnitud de la interacción débil g_w, y por la temperatura T. Combinando estas magnitudes en una expresión con unidades de $(\text{tiempo})^{-1}$, se obtiene:

$$\text{ritmo de reacción} \sim g_w^{\,2}k^5T^5/\hbar^7c^6. \qquad (3.3)$$

Igualando (**3.2**) y (**3.3**) obtenemos una expresión para la temperatura a la que se rompe el equilibrio:

$$kT_F \sim G^{1/6}g_w^{-2/3}\hbar^{11/6}c^{7/6}. \qquad (3.4)$$

En este punto se descubre una extraordinaria coincidencia. En primer lugar, la diferencia entre las masas del neutrón y el protón es sólo un poco mayor que la masa del electrón:

$$\Delta m \simeq m_e. \qquad (3.5)$$

En segundo lugar, la magnitud de la interacción débil está relacionada —al parecer de un modo accidental— con la magnitud de la gravedad mediante la siguiente relación numérica:

$$(Gm^2/\hbar c)^{1/4} \simeq g_W m_e{}^2 c/\hbar^3 \sim 10^{-11}. \qquad (3.6)$$

Cuando se utilizan estos accidentes numéricos en la ecuación (**3.4**) se obtiene:

$$kT_F \simeq \Delta mc^2. \qquad (3.7)$$

Pero el factor de Boltzmann es $\exp(-\Delta mc^2/kT_F)$, el cual, por la relación (**3.7**), tiene un exponente del orden de la unidad. Este factor determina el cociente cósmico protón/neutrón, y el análisis anterior indica claramente que la abundancia de neutrones será una fracción apreciable, bien que no muy grande, del contenido total de partículas nucleares del Universo. Los cálculos detallados nos dan un valor de alrededor del 10%.

Si el factor $\Delta mc^2/kT_F$ no hubiera sido cercano a la unidad, este cociente hubiera sido o casi cero o casi 100%. Así pues, el contenido nuclear del Universo es extraordinariamente sensible a lo que parece un accidente numérico casual entre diferentes áreas de la física.

¿Cuáles son las consecuencias de estas relaciones fortuitas (**3.6** y **3.7**), entre constantes fundamentales? Si kT_F hubiera sido algo mayor que Δmc^2 (o si Δm hubiera sido apreciablemente menor que m_e), entonces el exponente del factor de Boltzmann hubiera sido pequeño y el propio factor muy cercano a la unidad. Por ejemplo, si kT_F =

$10\Delta mc^2$, entonces el cociente neutrón/protón sería de 0,9. Esto hubiera tenido un efecto muy profundo en la consiguiente estructura del Universo, por la siguiente razón.

Cuando la temperatura descendió por debajo de los 10^9 K (la temperatura de fotodesintegración del deuterón), los neutrones libres se combinaron rápidamente con los protones libres formando deuterio. El deuterio dio origen después al helio:

$$n + p \rightarrow D$$

$$D + D \rightarrow \text{pasos intermedios} \rightarrow {}^4\text{He}.$$

El ^{4}He contiene igual número de protones que de neutrones. Si todos los neutrones disponibles se juntaron para formar helio, entonces todo el hidrógeno cósmico proviene de los protones no emparejados, cuya existencia es debida a la sobreabundancia de protones con respecto a los neutrones, causada por el factor de Boltzmann. Si el factor de Boltzmann fuera cercano a la unidad, quedaría muy poco hidrógeno.

El hidrógeno cumple un papel fundamental en la química del Universo. Sin hidrógeno no habría materia orgánica ni agua. No podrían existir planetas con grandes océanos, como la Tierra. Más aún, el hidrógeno es el combustible de todas las estrellas estables ordinarias, como el Sol. Sin este combustible aún podrían formarse estrellas, pero su aspecto y su comportamiento serían muy diferentes. En particular, las estrellas de helio vivirían mucho menos tiempo antes de explotar o consumirse. Así pues, la existencia de las estructuras macroscópicas más significativas en la naturaleza —las estrellas de hidrógeno— depende de relaciones numéricas accidentales entre las constantes fundamentales, relaciones resumidas en (**3.6**) y (**3.7**).

La existencia del hidrógeno parece aún más extraordinaria cuando recordamos que los neutrones y los protones son, en realidad, partículas compuestas que difieren tan sólo en su contenido de quarks *u* y *d*. La diferencia de masas, Δm, es solamente 10^{-3} veces

la masa del protón, lo cual supone una pequeña corrección. Si la corrección fuera solamente una tercera parte de este valor, entonces los neutrones libres no podrían desintegrarse en protones, ya que no tendrían suficiente masa para producir el electrón necesario. Y aún más, si la masa del neutrón fuera solamente 0,998 veces su valor real (es decir, si el quark *u* fuera ligeramente más pesado que el quark *d)* entonces los protones libres se desintegrarían en neutrones por emisión de positrones: $p \rightarrow n + e^{+} + \nu$. En tal caso, ¡probablemente no existirían átomos!

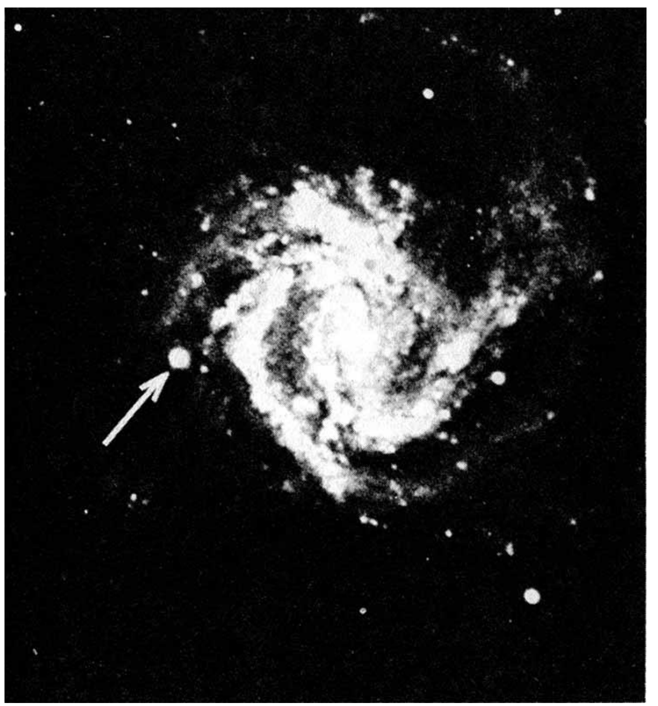


Fig. 9. Supernova en una galaxia espiral. La foto recoge la explosión de una estrella, que durante un breve período eleva de forma apreciable la luminosidad de toda la galaxia. La sobreexposición es responsable del aspecto un tanto borroso de la imagen.

Si kT_F fuera mucho menor que Δmc^2, el cociente neutrón/protón sería casi cero y habría poco helio en el Universo. Esto probablemente tendría pocas consecuencias fundamentales (si bien la presencia del helio primitivo en las estrellas afecta hasta cierto punto a sus características). Sin embargo, existe otra razón por la cual la constante de acoplamiento débil g_w no podría variar mucho sin afectar profundamente la estructura química del Universo. Esta razón tiene que ver con uno de los procesos más importantes y espectaculares de la naturaleza: las supernovas.

Cuando una estrella de gran masa agota su combustible nuclear, el núcleo de la estrella se vuelve inestable frente a la contracción gravitatoria. Al no ser ya capaz de generar el calor necesario para mantener su presión interna, el núcleo comienza a contraerse bajo su propio peso. En determinadas circunstancias, la contracción se convierte en una implosión catastrófica, en la que el centro estelar alcanza densidades nucleares en una fracción de segundo.

La implosión libera una enorme cantidad de energía gravitatoria, la mayor parte de la cual es transportada hacia el exterior por los neutrinos. Si bien las estrellas ordinarías son transparentes a los neutrinos, el núcleo extraordinariamente compacto de la estrella es tan denso que ejerce una impedancia apreciable sobre los neutrinos salientes. Se cree que la presión ejercida por el flujo de neutrinos puede expulsar las capas exteriores de la estrella hacia el espacio. Así pues, el núcleo implosiona y la periferia explosiona. La explosión da origen a un enorme incremento de la luminosidad, tal que en pocos días la estrella puede rivalizar en brillo con toda una galaxia. Esta titánica erupción se conoce con el nombre de supernova. Fenómenos de este tipo ocurren unas tres veces por galaxia y por siglo.

Las supernovas juegan un papel importante en la evolución química de las galaxias. El material galáctico de origen primitivo consiste casi por entero en hidrógeno y helio. ¿De dónde proceden, pues, los elementos pesados? Se sabe que son sintetizados en el interior de

las estrellas. Pero, ¿cómo salen de éstas? La estrella vieja que explota es rica en elementos pesados que han sido sintetizados en su interior por continuas reacciones nucleares. La explosión de la supernova dispersa este material rico en elementos por toda la galaxia. Cuando se forman generaciones sucesivas de estrellas y planetas, éstos incorporan los restos de estas estrellas desaparecidas. Debemos el carbono de nuestros cuerpos, el núcleo de hierro de nuestro planeta y el uranio de nuestros reactores nucleares a las supernovas que explotaron antes de la formación del Sistema Solar. Sin las supernovas no existirían planetas como la Tierra.

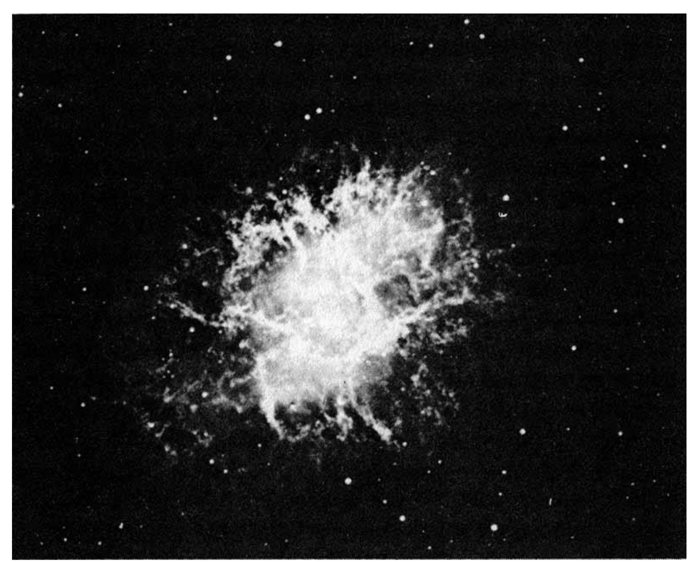


Fig. 10. Un resto de supernova. En 1054 los astrónomos orientales fueron testigos de la explosión de una estrella en la constelación de Taurus. Sus restos toman la forma de una nube de gas deshilachada conocida como la Nebulosa del Cangrejo. Cerca de su centro se encuentra una estrella de neutrones en rápida rotación (pulsar), que es lo que queda del núcleo de la estrella.

Si la interacción débil fuera mucho más débil, los neutrinos no podrían ejercer una presión suficiente sobre las capas externas de la estrella como para causar una explosión de supernova. Por otra parte, si fuera mucho más fuerte, los neutrinos quedarían atrapados en el interior del núcleo sin poder escapar. En ambos casos, la organización química del Universo sería muy diferente.

3.2 NÚCLEOS

En la sección anterior vimos que la estructura del Universo depende de forma muy estricta de los detalles de la fuerza nuclear débil. Conclusiones similares pueden extraerse con respecto a la fuerza nuclear fuerte.

La fuerza fuerte es la responsable de mantener unidos a los núcleos atómicos contra la repulsión eléctrica de los protones. Por ser una interacción de corto alcance, la fuerza fuerte actúa solamente entre partículas nucleares próximas entre sí. Por contraste, la fuerza eléctrica actúa entre todos los protones del núcleo. Es decir, un protón del núcleo es atraído por la fuerza nuclear de sus vecinos, y es repelido por el campo eléctrico acumulado de los otros protones. En un núcleo grande y pesado, con muchos neutrones y protones, la fuerza de unión no es más fuerte que en un núcleo ligero, pero la fuerza eléctrica es mayor debido al mayor número de protones. Si el núcleo es suficientemente grande, la fuerza eléctrica será mayor que la atracción nuclear y el núcleo se desintegrará.

De hecho, la inestabilidad nuclear aparece mucho antes que este caso extremo. Cuando un núcleo sufre una deformación y pierde su habitual configuración esférica, su área superficial aumenta. Las partículas suplementarias de la superficie son mucho menos firmes que las situadas en el interior del núcleo, ya que tienen aproximadamente la mitad de partículas vecinas que las del interior. En consecuencia, el núcleo adquiere más energía superficial. Pero la defor-

mación reduce la energía eléctrica al incrementar la separación media entre los protones. En los núcleos ligeros, la ganancia de energía superficial supera la pérdida de energía eléctrica y hay una tendencia a eliminar la deformación: el núcleo intenta adoptar su estado de mínima energía. Pero en los núcleos pesados la energía eléctrica domina y la deformación se ve amplificada, originándose la fisión nuclear. La fisión se agudiza gracias a los efectos cuánticos de túnel que pueden producir la desintegración, con menor probabilidad, de núcleos todavía más ligeros. La fisión asimétrica, como en el caso de la emisión de partículas alfa, es aún más probable.

La vida media de todos los núcleos conocidos más pesados que el uranio es considerablemente menor que la edad de la Tierra. Si la fuerza nuclear fuerte fuera algo más débil, habría menos elementos químicos estables. Es difícil hacer estimaciones, ya que el núcleo es un sistema complicado y las fuerzas nucleares todavía no se conocen bien, pero es probable que si el valor de la constante de acoplamiento fuerte g_S fuera, por ejemplo, la mitad del observado, entonces núcleos tales como el hierro, o incluso el carbono, no sobrevivirían mucho tiempo.

Se pueden obtener consecuencias mucho más drásticas de los cambios de valor de g_S a partir de consideraciones sobre el núcleo más simple, el deuterón, que consiste en un protón y un neutrón. La fuerza fuerte que mantiene unido al deuterón tiene un alcance de unos 10^{-15} m. Para mantener a una partícula confinada en un radio de Δx, es necesario, por el principio de incertidumbre de Heisenberg, que el momento de la partícula no sea inferior a $h/\Delta x$, lo cual corresponde a una energía cinética de $h^2/2m\,(\Delta x)^2$. En el caso del deuterón, esto viene a ser unos 6×10^{-12} J. Pero la energía potencial nuclear es escasamente mayor que este valor. La energía de unión nuclear neta es $3{,}6\times10^{-13}$ J. Si la fuerza nuclear fuera alrededor de un 5% más débil, no podría existir el deuterón: la energía cuántica del punto cero sería mayor que la energía de atracción nuclear.

El deuterio cumple un papel vital en la alimentación del Sol y de otras estrellas. El Sol quema el combustible mediante una secuencia de reacciones nucleares que comienzan con la fusión de dos protones para formar un deuterón, un positrón y un neutrino:

$$p + p \rightarrow D + e^{+} + \nu.$$

Éste es un proceso de interacción débil que conlleva el inverso de una desintegración beta, es decir, un protón se convierte en un neutrón. Rápidamente se producen más procesos de fusión en los que interviene el deuterio:

$$D + p \rightarrow {}^{3}\mathrm{He}$$

$${}^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2p$$

por ejemplo. Éste es un proceso de interacción fuerte que sólo involucra una redistribución de neutrones y protones, no su transmutación, y en consecuencia es mucho más rápido que la primera reacción. Sin el deuterio no se podría producir la principal cadena de reacciones nucleares utilizada por el Sol. Es muy dudoso que, sin él, pudieran existir estrellas estables de larga vida.

Si la interacción fuerte fuera solamente un poco mayor de lo que es, las consecuencias serían aún más profundas. Dos protones podrían mantenerse unidos. El di–protón es menos estable que el deuterón por dos razones. En primer lugar, existe una repulsión eléctrica entre los protones. En segundo lugar, el principio de exclusión de Pauli impone que los protones se alineen con sus *spins* en oposición, y la atracción nuclear en tal configuración se reduce.

Una vez más nos encontramos ante una situación crítica. Al di–protón le faltan solamente $1,5\times10^{-14}$ J para mantenerse unido. Podemos comparar este valor con la energía de unión media por partícula nuclear en un núcleo típico, que es de $1,3\times10^{-12}$ J. Un incremento de alrededor de un 2% en la constante de acoplamiento nuclear g_S sería

suficiente para mantener unido al di–protón. En tal caso, sería energéticamente favorable que se desintegrara mediante la interacción débil para formar un deuterón.

Freeman Dyson ha señalado que la existencia de di-protones haría que el hidrógeno ordinario fuera catastróficamente explosivo. El Sol consume su hidrógeno lenta y sistemáticamente, ya que el primer paso en la cadena de reacciones que hemos mencionado más arriba está controlado por la fuerza débil, lo cual permite un ritmo muy bajo de producción de deuterio. Si el deuterio pudiera formarse a partir del di–protón, el primer paso, tan importante, dependería de la interacción fuerte y sería unas 10^{18} veces más eficiente. Entonces se produciría un consumo catastrófico de hidrógeno con la consiguiente liberación de energía. En realidad, es muy poco probable que hubiera quedado ningún resto de hidrógeno después de la fase caliente primitiva. El Universo estaría hecho casi por entero de helio, con las consecuencias que ya hemos discutido en el **apartado 3.1**.

La estructura del núcleo y las reacciones nucleares dependen también, evidentemente, de la magnitud de las fuerzas eléctricas. Si la carga del protón fuera mayor, la estabilidad de los núcleos pesados se vería amenazada de la misma forma que si la fuerza nuclear fuerte fuera más débil.

3.3 ESTRELLAS

En el **apartado 2.3** destacamos las características esenciales de la estructura estelar y señalamos que la densidad de energía de radiación de una estrella típica es comparable con la energía cinética de las partículas. De hecho, la estructura de la estrella depende bastante estrechamente de su capacidad de transportar por radiación el calor producido en su núcleo. En las estrellas de mayor masa la energía de radiación es dominante y la energía calorífica escapa fundamentalmente por el flujo de radiación. Son las llamadas gigantes azules.

En estrellas de masa algo menor este mecanismo no funciona, ya que la radiación no puede fluir con la rapidez suficiente para mantener la superficie de la estrella lo bastante caliente. Esto es importante, ya que, a menos que el material de la superficie esté parcialmente ionizado, se producen inestabilidades que llevan a la aparición de la convección. La agitación convectiva complementa el flujo de energía radiante e impide que la temperatura disminuya demasiado por debajo de la temperatura de ionización. En consecuencia, las estrellas cuyo mecanismo de escape dominante es la convección son más pequeñas y más frías que las gigantes azules; se las conoce con el nombre de enanas rojas. El Sol, al igual que muchas otras estrellas estables, está dentro de una estrecha zona delimitada por los dos casos extremos de gigantes azules y enanas rojas.

En el **apartado 2.3** obtuvimos una fórmula para la masa de una estrella típica: la ecuación (**2.18**). Es sorprendente que esta masa típica M_* caiga exactamente dentro de la estrecha franja entre las gigantes azules y las enanas rojas. Esta circunstancia, a su vez, es consecuencia de una relación aparentemente accidental entre las magnitudes relativas de la gravedad y del electromagnetismo, como veremos a continuación. Nuestro tratamiento seguirá el argumento original de Brandon Cárter.

La temperatura de la superficie de la estrella, T_S, se relaciona con la temperatura central, T_C, a través de la luminosidad. El ritmo de emisión de energía radiante por unidad de área en la superficie de la estrella es $l/4\sigma c T_S^4$, de forma que, por (**2.25**),

$$\sigma c T_S^4 R^2 \sim L \sim 16\pi^2 \varepsilon^2 \sigma T_S^4 R^4 m_e^2 c^5 / N e^4.$$

Despejando R por medio de (2.23) se obtiene:

$$T_S^4 \sim 16\pi^2 \varepsilon^2 T_C^4 R^4 m_e^2 m_P G^{1/2} h^{3/2} c^{11/2} / e^4 k^2. \qquad (3.8)$$

La temperatura central se ajustará de forma automática de manera que el ritmo de producción de energía por combustión nuclear

sea igual al flujo de energía en la superficie. Las reacciones nucleares se pondrán en marcha cuando la energía térmica media de un protón del núcleo estelar se acerque a la energía necesaria para atravesar la barrera de Coulomb (eléctrica) de los otros protones.

Esta energía viene determinada por dos factores opuestos. El primero es la distribución de energía de los protones del núcleo estelar. Vendrá dada por la ley de Maxwell–Boltzmann, con el correspondiente factor $\exp(-E/kT)$. Así pues, el número de protones cuya energía E es mucho mayor que kT (que son los que con mayor probabilidad atravesarán la barrera) decrece exponencialmente con E. Por otra parte, la facilidad con que se atraviesa la barrera crece con la energía, ya que los protones están más cerca del borde superior de la barrera de fuerza nuclear. También coadyuvarán a la penetración los efectos cuánticos de túnel. El factor de penetración resultante es $\exp(-b/E^{1/2})$, donde $b \simeq m_P{}^{1/2}e^2/4\pi\varepsilon\hbar$. El producto de los factores de penetración y de Maxwell–Boltzmann tiene un máximo aproximadamente en $E = (bkT)^{2/3}$. En consecuencia, los protones más eficientes en la combustión nuclear son aquellos cuya energía es cercana a este valor. Se producirán abundantes reacciones si este valor óptimo no está lejos del valor medio; por ejemplo, si $kT_C \sim 10^{-2}b^2 \simeq 10^{-2}m_P e^4/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2$. La temperatura no debe subir muy por encima de este valor para que se mantenga el suministro de energía.

Para que la estrella evite la inestabilidad convectiva, kT_S debe ser mayor que la energía de ionización $\sim 0{,}1e^4m_e/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2$, de manera que a partir de (**3.8**) tenemos:

$$k^4T_S{}^4 \sim 10^{-4}m_p{}^3m_e{}^2e^4G^{1/2}c^{11/2}/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^{5/2} \gtrsim 10^{-4}e^{16}m_e{}^4/(4\pi\varepsilon)^8\hbar^8,$$

que se reduce a:

$$\alpha_G \gtrsim \alpha^{12}(m_e/m_P)^4, \qquad (3.9)$$

donde α es la constante de estructura fina electromagnética. Esta interesante expresión compara la magnitud de la gravedad (a la izquierda) con la del electromagnetismo y el cociente entre las masas del protón y el electrón. Además, α está elevada a la decimosegunda potencia, de forma que la desigualdad es muy sensible al valor de *e*.

Si damos a los parámetros sus valores numéricos, obtenemos $5{,}9\times10^{-39}$ a la izquierda y $2{,}0\times10^{-39}$ a la derecha. Es evidente que la naturaleza ha elegido el valor de las constantes fundamentales de tal modo que las estrellas típicas se encuentran muy cerca del límite de la inestabilidad convectiva. El hecho de que los dos lados de la desigualdad (**3.9**) sean números tan enormes, y aun así tan próximos, es realmente sorprendente. Si la gravedad fuera *sólo un poco* más débil, o el electromagnetismo *sólo un poco* más fuerte (o el electrón ligeramente menos masivo con respecto al protón), todas las estrellas serían enanas rojas. El cambio correspondiente en el otro sentido haría que todas ellas fueran gigantes azules. Carter mantiene que la convección en la superficie de una estrella juega un papel importante en la formación de planetas, de manera que es posible que en un mundo donde la gravedad fuera ligeramente más débil no hubiera planetas. En cualquier caso, más débil o más fuerte, la naturaleza del Universo sería radicalmente diferente.

3.4 GALAXIAS

Los astrónomos todavía desconocen cómo se formaron las galaxias, pero es evidente que el papel de la contracción gravitatoria debe haber sido importante. Si los gases cósmicos originados en la fase primitiva del Universo estaban distribuidos más o menos uniformemente por todo el espacio, entonces, al irse expandiendo el Universo, la densidad debía disminuir de forma sistemática. Sin embargo, tal como explicamos en el **apartado 2.4**, en aquellas regiones donde la densidad del gas era mayor, la gravedad del gas acumulado

facilitó la captura de materia del entorno, con la consiguiente amplificación de las perturbaciones de densidad. Los gases cercanos a esta acumulación experimentaron dos influjos opuestos: la dispersión debida a la expansión cosmológica y la atracción producida por la influencia gravitatoria local.

Debido a estas tendencias opuestas, el crecimiento de las aglomeraciones y su diferenciación final del entorno ocurrieron de forma lenta. Así, para admitir que este modelo nos ofrece una explicación plausible de la formación de galaxias, es necesario aceptar que las irregularidades de la densidad inicial eran ya muy pronunciadas.

Para pasar de una nube de gas bastante uniforme a un conjunto de estrellas compactas debe disiparse una gran cantidad de energía gravitatoria. Esto puede producirse por emisión de calor por la nube. Una aglomeración de gas se calienta al contraerse. La elevada temperatura impedirá la fragmentación en estrellas. Pero al final, la nube de gas emitirá radiación y comenzará a enfriarse. Si el ritmo de enfriamiento es lento tampoco se formarán estrellas. Es probable que la nube se distorsione y se rompa en trozos más pequeños. Por otra parte, si el ritmo de enfriamiento supera el ritmo de contracción de la nube, aparecerán las inestabilidades y la nube se fragmentará en subunidades cada vez menores, las últimas de las cuales serán las estrellas.

De acuerdo con este modelo, el tamaño de las galaxias está por debajo de un límite superior, determinado por la competición entre el tiempo de contracción, t_{contrae}, necesario para que la nube se contraiga de manera apreciable, y el tiempo de enfriamiento, $t_{\text{enfría}}$, necesario para que la nube se enfríe de manera apreciable. Las nubes de gas de mayor tamaño no llegarán a convertirse en galaxias de estrellas.

El tiempo de contracción es aproximadamente el tiempo necesario para que una partícula típica caiga desde el borde al centro de la aglomeración por efecto de la fuerza gravitatoria. Para una nube de

masa M y radio *R* este valor es, de acuerdo con la teoría elemental newtoniana,

$$t_{\text{contrac}} \sim (GM/R^3)^{-1/2} \qquad (3.10)$$

La escala de tiempo de enfriamiento constituye un tema más complicado. Si el gas ya está a una temperatura suficientemente baja, se puede enfriar de forma eficiente mediante procesos tales como la emisión de radiación debida a la recombinación iónica. Por el contrario, el ritmo de enfriamiento de un gas caliente será mucho más lento, y se deberá básicamente en la emisión de radiación por electrones libres *(bremsstrahlung)* próximos a la superficie. La teoría de este proceso es muy clara pero bastante complicada, y no la reproduciremos aquí. Tal como es de esperar, dependerá de la sección eficaz de dispersión de Thomson (2.19), de la masa m_e y de la densidad n de electrones, y de la temperatura *T*. Combinando estas magnitudes en una expresión con unidades de tiempo obtenemos:

$$t_{\text{enfría}} \sim (1/n\alpha\dot{\Sigma}c)(kT/m_ec^2)^{1/2} \simeq (16\pi^2\varepsilon^2 m_e{}^2c^3/\alpha e^4 n)(kT/m_ec^2)^{1/2} \qquad (3.11)$$

En este punto observamos que la temperatura de la nube está relacionada con su tamaño. En un gas difuso no hay presión de degeneración, de manera que la ecuación (**2.13**) nos da:

$$kT \sim GMm_{\text{P}}/R. \qquad (3.12)$$

Aunque ya vimos esta relación en el **capítulo 2** para el caso del equilibrio, se basa en un teorema fundamental de la mecánica (el teorema del virial) y su aplicación es muy general. En particular, debe ser una buena aproximación para una nube de gas que ya se ha contraído de forma apreciable. De acuerdo con la hipótesis central no se formarán estrellas en la nube si $t_{\text{enfría}} > t_{contrac}$. De (**3.10**) − (**3.12**) esta condición se reduce a:

$$R > R_C \sim \alpha^4 \alpha_G^{-1} (m_P / m_e)^{1/2} a_0. \qquad (3.13)$$

Solamente empezarán a formarse estrellas en abundancia si la nube ionizada se contrae por debajo del radio crítico R_C.

R_C es independiente de la masa, y no es muy grande (según los cálculos, R_C no es mucho mayor que la Vía Láctea). En consecuencia, las nubes de gran tamaño y masa no formarán estrellas con facilidad.

Sin embargo, si la nube está lo bastante fría para no estar ionizada, se enfriará con facilidad y se formarán estrellas. A partir de (**3.12**) vemos que las nubes de masa pequeña son las frías, de manera que habrá una masa crítica, M_g, por encima de la cual la nube no se fragmentará en estrellas. Esta masa está determinada por la condición de que kT sea mayor que la energía de ionización para $R > R_C$. A partir de (**3.12**) y (**3.13**) vemos que esta condición implica una masa galáctica *máxima:*

$$M_g \sim \alpha_G^{-2} \alpha^5 (m_p / m_e)^{1/2} m_P. \qquad (3.14)$$

¿Cuán grande es M_g? Recordando la ecuación (**2.18**), según la cual la masa de una estrella típica es $M_* \sim \alpha_G^{-3/2} m_p$, *se* obtiene de (**3.14**):

$$M_g \sim \alpha^5 \alpha_G^{-1/2} (m_P / m_e)^{1/2} M_*, \qquad (3.15)$$

es decir, unas $10^{11} - 10^{12}$ masas solares, que es una estimación razonable. (La Vía Láctea tiene 10^{11} masas solares.)

En el **apartado 2.4** introdujimos un parámetro cósmico importante: el número de protones en el Universo observable, *N*. Señalamos que $N \sim 10^{80}$. Poniendo $N \sim \alpha_G^{-2}$, se sigue de (**3.14**) que el número de galaxias en el Universo es:

$$N_g \sim \alpha^{-5} \sim 10^{10}, \qquad (3.16)$$

donde hemos supuesto que la masa de una galaxia típica es $\sim(m_e/m_P)^{1/2}M_g$.

Es sorprendente que el número de estrellas de una galaxia típica sea aproximadamente el mismo que el de galaxias del Universo. Por (**3.15**) y (**3.16**) vemos que esta coincidencia proviene del accidente numérico:

$$\alpha_G \sim \alpha^{20} . \qquad (3.17)$$

4. Coincidencias cósmicas

En el capítulo anterior pasamos revista a una serie de ejemplos que ponen de manifiesto que la naturaleza del mundo físico depende estrechamente de la cooperación, aparentemente fortuita, entre diferentes ramas de la física. En particular, relaciones numéricas accidentales entre magnitudes tan distintas como las constantes de estructura fina de la gravedad y del electromagnetismo, o entre la intensidad de las fuerzas nucleares y las condiciones termodinámicas del Universo primitivo, sugieren que muchos de los sistemas conocidos del Universo son resultado de coincidencias extraordinariamente improbables.

Si pasamos a la cosmología —el estudio de la estructura a gran escala y de la evolución del Universo— descubrimos también una cooperación cósmica de una naturaleza tan improbable que se hace difícil resistirse a la idea de que nos encontramos ante algún principio básico. Muchos de los ejemplos que discutiremos en este capítulo hacen referencia a las condiciones iniciales del Universo, más que a relaciones numéricas. Sin embargo, presentaremos un famoso caso numerológico que nos ofrece el ejemplo más clásico de la clase de coincidencias que constituyen el tema de este libro.

4.1 LOS GRANDES NÚMEROS

En gran parte de los análisis de las secciones anteriores nos hemos encontrado con el número 10^{40}. Reunamos los ejemplos:

$$\alpha_G^{-1} \sim 10^{40} \qquad (4.1)$$

$$N \sim 10^{80} = (10^{40})^2 \qquad (4.2)$$

$$N_* \sim 10^{60} = (10^{40})^{3/2} \quad (4.3)$$

$$t_H/t_N \sim 10^{40} \quad (4.4)$$

$$t_N/t_P \sim 10^{20} = (10^{40})^{1/2} \quad (4.5)$$

o

$$t_H/t_P \sim 10^{60} = (10^{40})^{1/2} = (10^{40})^{3/2}. \quad (4.6)$$

Los físicos y los cosmólogos han observado la repetida aparición de este curioso número en varios contextos sin relación aparente.

Otros ejemplos, quizá no tan sorprendentes, son:

$$\alpha_w \equiv g_W m_e^2 c/\hbar^3 \sim (10^{40})^{1/4} \quad (4.7)$$

$$S \sim (10^{40})^{1/4} \quad (4.8)$$

$$N_{*g} \sim N_g \sim (10^{40})^{1/4} \quad (4.9)$$

donde N_{*g} y N_g son, respectivamente, el número de estrellas en una galaxia y el número de galaxias en el Universo.

Antes de embarcarnos en una discusión de los grandes números es necesario decir algo sobre la exactitud que presupone el símbolo ~. En la **tabla 5** vemos que $\alpha_G^{-1} = 1{,}7\times10^{38}$, de manera que decir que $\alpha_G^{-1} \sim 10^{40}$ puede ser llevar muy lejos la convención de que tal símbolo represente una aproximación dentro de un orden de magnitud. No obstante, debemos tener en cuenta dos cosas. En primer lugar, cuando lo comparamos con 10^{40}, incluso 10^2 es pequeño. En segundo lugar, algunos de los factores a partir de los cuales obtuvimos

α_G son simplemente fruto de convenios. Por ejemplo, podríamos utilizar h en lugar de $\hbar$. La elección no afecta de forma alguna a los argumentos generales que hemos utilizado. El lector exigente que desee rehacer los cálculos y fórmulas con mayor precisión puede utilizar las **tablas 3** y **4**.

Tabla 5. Datos útiles (Unidades SI)

Grandes números:	
$\alpha_G^{-1} \equiv \hbar c/Gm_P^2 = 1{,}7\times10^{38}$	Inverso de la constante de “estructura fina” gravitatoria
$\hbar c/Gm_e^2 = 5{,}7\times10^{44}$	
$\hbar c/Gm_P m_e = 2{,}3\times10^{41}$	
$e^2/4\pi\varepsilon Gm_P m_e = 2{,}3\times10^{39}$	Relación entre fuerzas en el átomo *H’*
Pequeñas distancias (m)	
$h/rripC = 1{,}3\times10^{\sim15}$	Longitud de onda Compton del protón
$h/m_\pi c = 8{,}9\times10^{-15}$	Longitud de onda Compton del pión
$e^2/4\pi\varepsilon m_e c^2 = 2{,}8\times10^{\cdot15}$	Radio clásico del electrón
Tiempos pequeños (s) ~ t_N	
$h/m_P c^2 = 4{,}4\times10^{-24}$	
$h/m_\pi c^2 = 3{,}0\times10^{-23}$	
$e^2/4\pi\varepsilon m_e c^3 = 9{,}3\times10^{-24}$	
Masa del pión	$2{,}49\times10^{\sim26}$
Masa del neutrón menos masa del protón	$2{,}30\times10^{-3\circ}$
Masa de la Tierra	$5{,}98\times10^{24}$
Masa de Júpiter	$1{,}90\times10^{27}$
Masa del Sol	$1{,}99\times10^{3\circ}$
Masa de la Vía Láctea	$3{,}6\times10^{41}$
Masa del Universo	10^{53}
Luminosidad del Sol	$3{,}90\times10^{26}$
Radio de la Tierra	$6{,}37\times10^{6}$
Radio del Sol	$6{,}96\times10^{8}$
Energía de la unión del átomo de hidrógeno	$2{,}18\times10^{-18}$

En física aparecen frecuentemente números como 4π o 3; pero ello no nos sorprende. Ahora bien, 10^{40}, que se obtiene a partir de

las constantes fundamentales de la naturaleza y que, en consecuencia, es posible que tenga una importancia fundamental, es extraordinariamente mayor que cualquiera de estos números familiares. Por ejemplo, el hecho de que α_G^{-1} sea muy grande es una expresión de la extrema debilidad de la gravedad. Durante mucho tiempo los físicos se han estado preguntando por qué la gravedad es tan débil en comparación con las otras fuerzas de la naturaleza: consideremos, por ejemplo, el electromagnetismo con $a^{-1} \simeq 137$. En los últimos años se han venido realizando intentos de unificar las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza en una sola teoría matemática. Según las primeras especulaciones, hay una conexión entre la gravedad y el electromagnetismo expresable mediante la relación numérica siguiente:

$$\pi / n\alpha_G^{-1} \sim a^{-1} .$$

En 1967, Steven Weinberg y Abdus Salam presentaron una teoría que combina la fuerza electromagnética con la fuerza nuclear débil. En esta teoría, el fotón, que actúa como mensajero de la fuerza electromagnética, va acompañado por otras partículas llamadas *W* y *Z* que transmiten la fuerza nuclear débil; *W* y *Z* son partículas de gran masa, lo cual explica el corto alcance de la fuerza débil (ver apartado 1.3). En la teoría de Weinberg–Salam el nexo entre las dos fuerzas se manifiesta en la relación numérica siguiente:

$$\alpha_w \sim \alpha(m_e/m_w)^2,$$

donde m_w es la masa de*W*. Observemos que la coincidencia (**4.7**), en la forma $\alpha_w^4 \sim \alpha_G$, es la feliz circunstancia que, como discutimos en el **apartado 3.1**, conduce a un Universo compuesto básicamente por hidrógeno.

Después del éxito de la teoría de Weinberg–Salam en describir una variedad de procesos subatómicos y reducir el número total de

fuerzas de cuatro a tres, se ha realizado un gran esfuerzo para unificar la fuerza electrodébil resultante con la fuerza nuclear fuerte. Se han propuesto varios esquemas. En las llamadas teorías de gran unificación, el fotón y la partícula *W* tienen otra partícula acompañante, esta vez de gran masa ($\gtrsim 10^{15}\ m_P$). Un curioso resultado de la mezcla de la fuerza fuerte, que se acopla a los quarks, con la fuerza electrodébil, que se acopla a los leptones (así como a los quarks) es que las identidades de los quarks y los leptones se difuminan, y pueden transmutarse unos en otros en ciertas circunstancias. Por ejemplo, existe una pequeña probabilidad de que un protón (que está formado por quarks) se desintegre, dando en último término un positrón (que es un leptón). Esta teoría da un tiempo de vida al protón de aproximadamente $t_N(m_X/m_P)^4$, donde m_X es la masa de la nueva partícula mensajera superpesada asociada con la teoría de gran unificación. Para evitar conflictos con los experimentos es necesario que $m_X \gtrsim 10^{15}\ m_P$, de modo que la vida asignada al protón es $t_p \gtrsim 10^{30}$ años.

La mayor parte de las teorías de gran unificación predicen que m_X se encuentra en el intervalo $(10^{15} - 10^{16})m_P$, y en la actualidad se están llevando a cabo experimentos muy sensibles para determinar si se cumple la predicción de que el protón se desintegra con un tiempo de vida media $\sim 10^{31}$ años. Es preciso destacar que si se confirma la predicción entonces $t_p/t_P \sim 10^{80}$, que es el cuadrado del número “mágico” 10^{40}. La razón estriba en que los valores predichos de m_X son muy próximos a la masa de Planck $m_P = (\hbar c/G)^{1/2}$, es decir, Gm_P^2 por $\hbar c = 1$. La masa de Planck, definida totalmente a partir de las constantes fundamentales de la gravitación y de la teoría cuántica, deberá cumplir un papel esencial en cualquier teoría futura de la gravedad cuántica. La aparición de una masa m_X cercana al valor m_P sugiere que es posible obtener una nueva síntesis: la de la teoría de gran unificación con la gravedad. En tal caso habría una única fuerza fundamental en la naturaleza que daría cuenta de todas las interacciones entre la materia. Con ello quedaría explicada la aparente coincidencia $m_X \sim m_P$.

Tanto si se puede como si no encontrar una razón física fundamental para la debilidad de la gravedad a partir de estas ideas, es un hecho que si la gravedad fuera más intensa la estructura del Universo se vería alterada drásticamente; por ejemplo, ya dijimos en el **apartado 3.3** que todas las estrellas serían gigantes azules. Y lo que aún es más grave, el Universo en su totalidad sería inestable frente al colapso gravitatorio; probablemente ya habría implosionado. El tiempo de caída libre newtoniano —el tiempo necesario para que implosione una bola esférica de materia— es de alrededor de $(GM/R^3)^{-1/2}$. Si tomamos M como la masa del Universo observable (unos 10^{53} kg) y R como su radio (10^{26} m), entonces el tiempo de desplome es de unos 10^{11} años (a comparar con la edad real de 2×10^{10} años). Es evidente que si G fuera ligeramente superior, el Universo ya habría desaparecido en la actualidad.

Siendo 10^{40} un número tan extraordinariamente grande, es aún más sorprendente encontrarnos con él en varios contextos aparentemente diferentes. Sir Arthur Eddington y Paul Dirac ya hicieron notar que la edad del Universo expresada en ciertas unidades naturales atómicas o nucleares también es muy próxima a 10^{40}. Este hecho se resume en la relación (**4.4**). No parece haber ninguna razón evidente por la cual la edad del Universo deba estar relacionada numéricamente con el número de partículas del Universo, como se desprende de las relaciones (**4.2**) y (**4.4**). Algunos físicos han quedado tan impresionados por esta coincidencia de números de origen tan dispar que le han asignado un profundo significado físico. En 1938 Dirac escribió: «Podemos suponer que tal coincidencia se debe a alguna profunda conexión, en la naturaleza, entre la cosmología y la teoría atómica.»

Desde luego, hay algo peculiar en todo ello. La edad del Universo no es una constante fundamental, sino que cambia con el tiempo. La magnitud t_H no es más que la época en la que nos ha tocado vivir. En consecuencia, Dirac propuso que G no debía ser considerada

tampoco como una constante de la naturaleza, sino que debería variar en proporción a 1/*t de* manera que la coincidencia numérica:

$$t_H/t_N \sim \alpha_G^{-1} \qquad (4.10)$$

se cumpliera para todas las épocas. A lo largo de los años se han estudiado teorías de este tipo, es decir, teorías que admiten una dependencia temporal de *G*. Aunque se han propuesto varias teorías detalladas que predicen este fenómeno, no hay ningún dato observacional en favor de la variabilidad de *G* (ver **apartado 2.1**).

Dicke ha dado una explicación alternativa de la coincidencia (**4.10**) de los grandes números. Su argumentación pretende fundamentalmente dar respuesta a la siguiente pregunta: El hecho de que la relación (**4.10**) se cumpla en la época presente, ¿es sólo resultado de una casualidad, o existe alguna razón especial por la cual vivamos en esta época en particular y no en cualquier otra? Con ello se involucra esencialmente a los observadores humanos; de hecho, la explicación de Dicke es parte de un conjunto de argumentos que intentan relacionar la estructura del mundo físico con nuestra propia existencia. En el próximo capítulo discutiremos los argumentos de Dicke y otros análisis parecidos.

El número mágico 10^{40} aparece todavía de otra forma. Se trata del número total de partículas cargadas en el Universo, *N*, concepto que presentamos brevemente en el **apartado 2.4**. La mayor parte de las partículas son protones y electrones, de manera que obtenemos el número *N* dividiendo la masa del Universo por m_P y multiplicando por 2. El valor obtenido es aproximadamente 10^{80}, que es la relación (**4.2**).

Si esta nueva coincidencia la escribimos en la forma:

$$N \sim (t_H/t_N)^2 \sim \alpha_G^{-1} (t_H/t_N) \sim 10^{40} \times 10^{40} \qquad (4.11)$$

a partir de (4.4), y ahora sustituimos t_N por el tiempo que tarda la luz en recorrer la longitud de onda Compton del protón, llegamos a la importante relación:

$$G\varrho t_H^2/c^2 \sim 1, \quad (4.12)$$

donde $\varrho = Nm_P c^2/(ct_H)^3$ es la densidad media de energía de la materia del Universo.

Llegados a este punto se hace necesario precisar qué entendemos por “el Universo”. Para obtener (**4.12**) hemos tomado $(ct_H)^3$ —el volumen de Hubble— como volumen del Universo. Sólo podemos apreciar lo que esto significa haciendo un pequeño paréntesis e introduciéndonos en la teoría cosmológica.

4.2 DINÁMICA CÓSMICA

En el apartado 1.5 señalamos que la dinámica de un Universo homogéneo e isótropo podía ser descrita mediante un solo parámetro, *a(t)*. El factor de escala obedecerá a una ecuación de movimiento determinada por las leyes de la gravedad. Curiosamente, tanto la teoría newtoniana como la teoría general de la relatividad llegan a la misma ecuación diferencial:

$$\mathring{a}^2/a^2c^2 + k/a^2 = 8\pi G\varrho/3c^4. \quad (4.13)$$

En nuestra época tomamos $a = 1$. El parámetro k, que no debe confundirse con la constante de Boltzmann, tiene unidades de (longitud)$^{-2}$. En la teoría general de la relatividad adquiere una sencilla interpretación geométrica. La forma del espacio en cualquier instante dado no tiene por qué ser la del espacio plano asociado con la geometría euclidiana. La teoría de Einstein predice que, en general, el espacio está deformado, o curvado. En un Universo uniforme esta curvatura debe ser constante en todas partes.

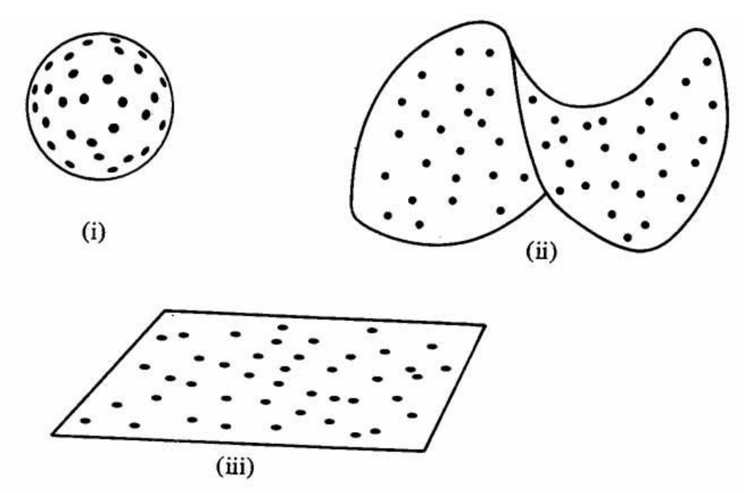


Fig. 11. La forma del Universo. De acuerdo con la teoría general de la relatividad de Einstein, la gravedad puede curvar el espacio. Un Cosmos uniforme sólo puede adoptar tres formas. Ilustramos los tres casos por analogía, sirviéndonos de superficies bidimensionales para representar el espacio tridimensional. Los puntos corresponden a galaxias distribuidas más o menos uniformemente por todo el espacio.
(i) El espacio tiene curvatura positiva y volumen finito (representado aquí como una superficie de área finita). Un astronauta aventurero podría circunnavegar el Universo.
(ii) El espacio tiene curvatura negativa. Sólo mostramos una parte, ya que su volumen es infinito.
(iii) El espacio es plano e infinito y satisface las reglas ordinarias de la geometría euclidiana.
En los tres casos hay que imaginar que las superficies se encuentran en expansión.

Se presentan dos posibilidades. Una es que la curvatura sea positiva, que corresponde a $k > 0$. En este caso, el espacio es cerrado y de volumen finito. La situación es análoga a la de la superficie de una esfera, que es de área finita y, sin embargo, homogénea (véase **fig. 11**). La superficie de la esfera no tiene límite ni borde ni tampoco

centro. Un Universo de curvatura positiva sería la versión tridimensional de la superficie de una esfera, y al igual que ésta tendría la propiedad de ser circunnavegarle. Un proyectil lanzado desde un punto cualquiera volvería, al cabo de un tiempo suficiente, al mismo punto desde la dirección opuesta.

Pero el Universo real también se expande. Es mejor, pues, compararlo con un globo que se hincha. Este modelo gráfico nos permite visualizar fácilmente el *Big Bang.* Cuando el globo se desinfla en el tiempo cero, su área se contrae y desaparece. El suceso de la creación equivale a la aparición instantánea del espacio, así como de la materia. No es la explosión de un trozo de materia en el seno de un vacío preexistente.

El caso de la curvatura negativa es más fácil de visualizar, ya que, cuando $k < 0$ el espacio es infinito. El espacio se curva hacia fuera, no hacia dentro (como en el caso de la esfera). Bidimensionalmente, esta geometría se representa a veces como una superficie en forma de silla de montar (**fig. 11 [ii]**).

El caso especial $k = 0$ corresponde a la desaparición de la curvatura espacial: el espacio es plano e infinito y podemos aplicar la geometría euclidiana ordinaria. Si bien la topología del Universo con $k > 0$ difiere del caso $k \leq 0$, la geometría local varía de forma continua cuando consideramos un conjunto de modelos con k pasando por cero. Para valores de k que se aproximan a cero desde valores negativos, el espacio se aplana progresivamente hasta que se convierte en euclidiano cuando $k = 0$. Para valores positivos pequeños de k, la curvatura es pequeña y el volumen (finito) del espacio es muy grande. A medida que k crece, crece el "radio" del Universo, y por tanto, su volumen decrece. La geometría estándar nos da la fórmula para el volumen: $2\pi^2 k^{-3/2}$.

Cuando $k > 0$ y el espacio es finito, la noción de número total de partículas en el Universo está bien definida, pero ¿qué ocurre en los casos infinitos, $k \lesssim 0$? En este punto es necesario tener en cuenta la

estructura causal del espacio-tiempo, determinada por la propagación de las señales de luz en la geometría distorsionada y en expansión.

Volviendo a la analogía del globo que se hincha, imaginemos un pulso de luz emitido en el punto *A* de la **figura 12**. A medida que la luz viaja por el Universo, las regiones distantes de *A* se alejan cada vez más debido a la expansión. Las regiones más distantes se alejan a mayor velocidad. En consecuencia, el pulso de luz va en persecución de las galaxias que se alejan. En cualquier momento dado habrá galaxias que todavía no habrán recibido luz del punto *A*, ya que la luz que fue emitida en el primer instante —la creación en el *Big Bang*, todavía no las ha alcanzado.

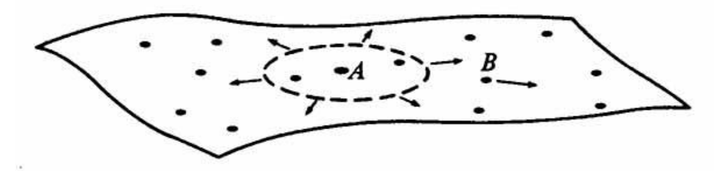


Fig. 12. El horizonte en el espacio. La luz emitida por la galaxia *A* va en busca de las otras galaxias que se alejan (por ejemplo *B)*. Dos efectos entran en acción: el frente de onda de la luz (línea discontinua) se expande, y el Universo también. Las galaxias distantes todavía no han recibido la luz que emitió *A* en el *Big Bang* la expansión cósmica es "más rápida" que la expansión del frente de onda de la luz. Las galaxias que aún no han recibido la primera luz de *A* no pueden, por simetría, ser vistas desde *A*. El límite del Universo observable desde *A* se denomina horizonte de partículas de *A*. Dado que la expansión cósmica se desacelera, el frente de ondas acabará llegando a todas las galaxias, de manera que a medida que transcurre el tiempo el horizonte abarca un número cada vez mayor de galaxias.

Este resultado puede parecer paradójico, ya que en el principio el espacio estaba comprimido y todas las galaxias estaban muy próximas entre sí. Se diría que cuando el espacio ocupaba un volumen muy pequeño, la luz pudo atravesarlo muy rápidamente. No obstante, es preciso recordar que en esta época primitiva el Universo

también se expandía más rápidamente, de manera que la luz tenía que perseguir a las regiones del Universo que se alejaban mucho más rápidamente que ahora. Estamos, pues, ante dos límites en competición. Al acercarnos al momento de la creación, en $t = 0$, las distancias que debe atravesar la luz tienden a cero, pero el ritmo de expansión se dispara al infinito. ¿Qué efecto prevalecerá?

Un análisis sencillo nos revela que si el ritmo de expansión ha estado disminuyendo desde el primer instante en $t = 0$, la luz no habrá podido atravesar todo el Universo hasta el momento. Dado que en los ejemplos (**1.16**) y (**1.17**) el ritmo de expansión disminuye con el tiempo, esto también ocurre, con casi toda certeza, en el Universo real.

Si la luz de *A* todavía no ha llegado a algunas galaxias, entonces estas galaxias no pueden saber nada acerca de *A*. Dado que todas las influencias físicas deben viajar a velocidad menor o igual que la de la luz, no puede existir ninguna conexión causal entre *A* y esas galaxias. La situación es simétrica: ninguna influencia de esas galaxias puede haber llegado a *A*. Por lo tanto, hay en todo instante una distancia límite alrededor de *A*, más allá de la cual el Universo no puede ejercer ningún efecto físico sobre *A*. Los observadores situados en *A* no pueden ver ningún suceso que ocurra más allá de esa distancia, a no ser que esperen hasta que les llegue el primer destello de luz. Esta división entre lo que puede verse y lo que no puede verse en un instante determinado recuerda al horizonte en la Tierra, y por ello se le denomina horizonte cósmico, o, más a menudo, horizonte de partículas. Divide al Universo en torno a cada punto en dos partes: las partículas que pueden verse desde el punto y las que no pueden verse. El horizonte de partículas se expande a la velocidad de la luz, y en un Universo en deceleración acabará por alcanzar cualquier galaxia por muy lejos que esté. Es evidente que si la expansión volviera a acelerarse no podríamos obtener la misma conclusión.

Los horizontes de partículas nos permiten dar una definición natural de "Universo observable". En cualquier época, t_H, un observador solamente puede ver hasta el horizonte, que es la distancia que ha viajado la luz desde la creación, es decir, alrededor de ct_H (el llamado radio de Hubble). Ésta es la definición que hemos utilizado al final del capítulo anterior para calcular el volumen del Universo. Como es natural, es proporcional al tiempo, ya que es igual al cociente t_H/t_N. Por otro lado, consideremos N, el número de partículas que hay en el interior del horizonte de partículas en la época t_H. El horizonte crece proporcionalmente con el tiempo, de manera que a primera vista parece que N será proporcional a $(\text{tiempo})^3$. Pero la densidad de partículas decrece a medida que el Universo se expande. Si aceptamos la relación (**1.16**), la densidad decrece proporcionalmente a $(\text{tiempo})^{-2}$. Así pues, N es proporcional al tiempo y no a $(\text{tiempo})^3$. Es evidente, pues, que la coincidencia $N \sim (t_H/t_N)^2$ no se dará siempre, ya que el término de la izquierda crece linealmente con el tiempo, mientras que el de la derecha lo hace en forma cuadrática.

Podemos preguntarnos si, en el caso $k > 0$, habrá coincidencia (**4.11**) si tomamos N como el número total de partículas en todo el espacio (finito), en vez de considerar tan sólo aquellas que están dentro del horizonte actual. Resulta que si k es bastante grande el horizonte abarca una fracción considerable del espacio en la época actual, de manera que ambas definiciones de "Universo" son prácticamente equivalentes. No obstante, veremos a continuación que $k \simeq 0$. Por esta razón debemos tomar la definición de N como el número de partículas que hay en el interior del horizonte de partículas.

Volvamos a la ecuación (**4.13**). Es fácil encontrar soluciones en el caso especial de que $k = 0$. Para la materia ordinaria $\varrho \propto a^{-3}$, ya que $\varrho a^3/c^2$ es la masa de materia en el volumen (en expansión) a^3, y ésta permanece constante en un Universo homogéneo. Si integramos la ecuación (**4.13**) vemos que $a \propto t^{2/3}$, como dijimos en el **apartado**

1.5. En un Universo dominado por la energía de radiación, $\varrho \propto a^{-4}$ Integrando (**4.13**) con $k \simeq 0$ se obtiene entonces que $a \propto t^{1/2}$.

Si bien estas soluciones representan un caso especial, constituyen una buena aproximación a la situación existente en la época primitiva. Ello es así ya que, cuando a es pequeño, el término k/a^2 es despreciable en comparación con $\varrho \propto a^{-4}$. En consecuencia, es de esperar que $a \propto t^{1/2}$ sea una buena descripción de la fase primitiva.

Para $k \neq 0$ hay una época característica $(c^4/k^2)^{-1/4}$ en la cual el término k empieza a tener efecto y ya no se puede ignorar. Para $k < 0$ este término llega a ser dominante y podemos olvidarnos totalmente de la materia. Si hacemos $\varrho = 0$ en (**4.13**) obtenemos que $a \propto t$. El Universo se expande a un ritmo uniforme, sin deceleración.

Para $k > 0$ ocurre algo más espectacular. El término k favorece la deceleración, que finalmente consigue detener la expansión por completo en un tiempo $\sim 1/ck^{1/2}$. En ese momento el Universo comienza a contraerse, y acabará autodestruyéndose en una contracción total.

¿Qué determina el valor de k? La relación $\mathring{a}/a$ es el recíproco del tiempo de Hubble t_H. Si $k = 0$ la ecuación (**4.13**) nos da:

$$8\pi G\varrho t_H^2/3c^2 = 1, \qquad (4.14)$$

que es una versión exacta de la relación (**4.12**). La ecuación (**4.14**) nos da, por tanto, una densidad de energía crítica característica de la materia:

$$\varrho_{crit} = 3c^2/8\pi G t_H^2 \qquad (4.15)$$

para la cual el Universo es plano espacialmente, y se expande proporcionalmente a $t^{2/3}$ una vez que la materia, y no la radiación, se convierte en la fuente dominante de energía.

Se sigue de (**4.13**) que si $\varrho > \varrho_{crit}$ entonces $K > 0$, el Universo es cerrado espacialmente y acabará contrayéndose. La gravedad adicional de la materia extra–densa arrastrará a las galaxias sobre sí

mismas. Para $\varrho < \varrho_{crit}$, la gravedad de la materia cósmica es más débil y el Universo "se escapa", expandiéndose libremente ($a \propto t$) como un proyectil que se aleja con rapidez. La geometría del Universo y su destino final dependen, pues, de la densidad de materia o, lo que es lo mismo, del número total de partículas del Universo, N. Estamos ahora en condiciones de comprender el significado de la coincidencia (**4.12**). Nos dice que la naturaleza ha elegido para N un valor muy próximo al requerido para que el Universo sea plano espacialmente, con $k = 0$ y $\varrho = \varrho_{crit}$.

Inspeccionando la ecuación (**4.13**) vemos que, dado que no hay ningún indicio de que en nuestra época domine el término de curvatura $k/\acute{a}^2$, éste debe ser pequeño comparado con los demás términos de la ecuación. En particular:

$$|k|/a^2 < 1/ct_H^2, \qquad (4.16)$$

donde $|k|$ denota la magnitud de k (que puede ser positiva o negativa). Si tomamos $a = 1$ en nuestra época, la ecuación (**4.16**) implica que el radio de curvatura del espacio, $r_S \equiv |k|^{-1/2}$, es como mínimo tan grande como el radio de Hubble actual ct_H.

Es interesante considerar lo que hubiera ocurrido si N fuera 10^{86}, por ejemplo, en lugar de 10^{80}. En tal caso la expansión cosmológica solamente hubiera durado 10^8 años y hace ya mucho tiempo que el Universo hubiera dejado de existir tras su desplome. De manera similar, si N fuera 10^{77} el término k hubiera tomado el control de la dinámica cósmica ya hace tiempo. Un ritmo de expansión más rápido ($a \propto t$ en lugar de $t^{2/3}$) hubiera tenido un efecto inhibidor sobre la formación de galaxias. En cualquier caso, la estructura del Universo hubiera sido muy diferente sin la coincidencia (**4.12**).

¿Es realmente extraordinaria la relación (**4.12**)? Las observaciones actuales indican que $0{,}01 < \varrho/\varrho_{crit} < 10$, de manera que $(\varrho - \varrho_{crit}) / \varrho_{crit}$ está entre –1 y +9. Esto quizá no parezca tan extraordinario. Sin embargo, debemos recordar que ϱ depende del tiempo. De (**4.13**) y (**4.15**) obtenemos:

$$(\varrho - \varrho_{crit}) / \varrho_{crit} = kc^2t^2/a^2 . \qquad (4.17)$$

En las épocas primitivas del Universo, cuando la energía de radiación dominaba la dinámica, $a \propto t^{1/2}$, de modo que el cociente anterior es proporcional a t. Así pues, aunque hoy día este cociente difiera de 0 dentro del orden de la unidad, un segundo después de la creación no era más que 10^{-18}. En el tiempo de Planck —la época más primitiva en la cual podemos confiar en la teoría— el cociente era un casi infinitesimal 10^{-60}. Si consideramos el tiempo de Planck como el instante inicial en que quedó determinada la posterior dinámica cósmica, es necesario suponer que la naturaleza tomó ϱ con una diferencia de ϱ_{crit} no mayor que una parte en 10^{60}.

No sabemos de ninguna razón física por la cual ϱ no pueda ser un número arbitrario. Aparentemente, la naturaleza podía haber elegido cualquier valor. El hecho de haber elegido ϱ tan próximo a ϱ_{crit}, ajustado de forma tan exacta, es uno de los grandes misterios de la cosmología. Si este ajuste tan extraordinario de valores se hubiera quebrado ligeramente, la posterior estructura del Universo hubiera sido totalmente diferente. Si la relación fundamental hubiera sido 10^{-57} en lugar de $< 10^{-60}$, el Universo no existiría: ya se habría desplomado tras existir unos pocos millones de años.

¿Por qué ϱ es tan próxima a ϱ_{crit}? O, por decirlo de otra forma, ¿por qué k es tan próxima a 0? A falta de razones físicas para explicar el valor de k, nos vemos inclinados a examinar los parámetros fundamentales de la teoría para determinar si contienen una curvatura característica. Entonces podríamos esperar que k no difiriera de este valor característico en más de unos pocos órdenes de magnitud.

Los parámetros incluidos en la teoría actual son G, h y c. La curvatura característica que podemos construir a partir de estas magnitudes es $c^3/G\hbar \sim 10^{70}\ m^{-2}$. Este valor es unas 10^{60} veces mayor que el valor de k/a^2 en el tiempo de Planck. Si la naturaleza hubiera elegido el valor "natural" de k/a^2, el Universo solamente hubiera vivido

unos $t_P \sim 10^{-43}$ s antes de hundirse en la nada o de explotar rápidamente en el vacío. Para conseguir un Universo de una longevidad unos 60 órdenes de magnitud mayor que la unidad fundamental natural de tiempo cósmico, t_P, se requiere un equilibrio entre ϱ y ϱ_{crit} de una precisión asombrosa.

Para resumir: lo que ocurrió, en lenguaje físico, es lo siguiente. La densidad de energía de la materia en el Universo, representada por ╞, determina su poder gravitatorio total. Un Universo de gran densidad ejerce una mayor gravedad y produce una mayor deceleración de la expansión. Si la densidad excede al valor crítico, ϱ_{crit}, entonces la gravedad vence a la expansión y consigue convertir el movimiento cósmico en desplome catastrófico. Si ϱ es mucho mayor que ϱ_{crit}, la extinción ocurrirá más pronto. Inversamente, si la densidad es muy pequeña, el poder gravitatorio del Universo es pequeño, y la expansión continúa de forma más o menos libre. Cuanto menor sea la densidad, con mayor rapidez la expansión dispersará el material cósmico. Si ϱ no está muy cerca de ϱ_{crit}, el Universo se hundirá rápidamente sobre sí mismo o explotará.

Este mismo equilibrio puede considerarse desde un punto de vista opuesto. Dada una densidad de material cósmico, la explosión creadora del Universo debe haber sido de un grado de magnitud perfectamente definido para poder alcanzar su estructura actual. Si la explosión es demasiado débil, el material cósmico se reunirá de nuevo tras una breve dispersión y dejará de existir en una gran contracción. Por otra parte, si la explosión es demasiado fuerte, los fragmentos saldrán despedidos a gran velocidad y pronto quedarán aislados, sin posibilidad de agruparse para formar galaxias. En realidad, la explosión que se produjo fue de una magnitud tan exactamente definida que el resultado se encuentra entre estas dos alternativas.

La situación es muy semejante al movimiento de un proyectil lanzado verticalmente desde la superficie de la Tierra. Si no se le da velocidad suficiente para vencer la gravedad terrestre, caerá pronto

sobre la Tierra. Si se le da una velocidad excesiva, se alejará velozmente por el espacio y nunca volverá. La línea divisoria entre estas dos alternativas corresponde a lanzar el proyectil con una velocidad exactamente igual a la denominada velocidad de escape —la mínima velocidad necesaria para que escape de la gravedad terrestre. En el caso cosmológico, la expansión se inició de una forma tan precisamente ajustada al poder gravitatorio que el Universo se ha “escapado” de su gravedad por muy poco.

Concluyamos esta sección señalando una forma alternativa de considerar esta notable circunstancia. En un Universo dominado por la radiación, la temperatura $T \propto t^{-1/2}$. La energía kT nos proporciona una unidad natural de longitud, $\lambda = hc/kT$, que es la longitud de onda de un fotón típico de la radiación. A partir de (**4.16**) obtenemos otra unidad de longitud: el radio de la curvatura espacial que, como ya dijimos, es como mínimo ct_H. La ecuación (**4.16**) nos indica que $|k| \propto (a/t_H)^2 \propto t^{-1}$ —si el Universo está dominado por la radiación— de manera que el radio de curvatura espacial $r_S = |k|^{-1/2} \propto t^{1/2}$, que exhibe exactamente la misma dependencia temporal que λ. El cociente λ/r_S es, por lo tanto, independiente del tiempo en un Universo dominado por la radiación. El valor actual de λ corresponde a una longitud de onda típica de la radiación térmica de fondo en microondas a 3°K, y es alrededor de 10^{-3} m. El radio de Hubble es ~10^{26} m, de manera que el cociente es de aproximadamente 10^{-28}. Pero ésta es una estimación por exceso, ya que el Universo ha estado dominado por la materia, y no por la radiación, tras los 10^5 primeros años. Esto ha hecho disminuir la temperatura en un factor de ~10, de manera que una mejor representación del cociente anterior es:

$$\lambda/r_S \lesssim 10^{-29}. \qquad (4.18)$$

El hecho de que el término derecho de la expresión (**4.18**) sea un número tan pequeño es otra expresión del hecho de que ϱ sea tan próxima a ϱ_{crit}. Este cociente, independiente del tiempo (al menos mientras el Universo estuvo dominado por la radiación), tiene un

carácter fundamental, y podemos considerarlo como un número cósmico característico. El hecho de que su valor sea tan próximo a $(10^{40})^{-3/4}$ parece indicar una nueva coincidencia de los grandes números. Pero el cociente (**4.18**) en realidad no es independiente de los otros parámetros cosmológicos, como veremos a continuación. Supongamos que *k* es tan pequeña que podemos despreciar en la ecuación (**4.13**) el término que contiene a *k*. Suponiendo que $\varrho = \sigma T^4$ (la ecuación de Stefan–Boltzmann) —que corresponde a un Universo dominado por la radiación— integramos (**4.13**) obteniendo:

$$kT = (45\hbar^3 c^5/32\pi^3 G\mathcal{N})^{1/4} t^{-1/2}, \qquad (4.19)$$

resultado éste que utilizamos para obtener la ecuación (**1.23**). Para obtener (**4.19**) hemos sustituido la constante de radiación a, teniendo en cuenta el hecho de que habrá varias clases de radiación presentes. Esto viene representado por el factor de peso $\mathcal{N}$.

Lo que sorprende en (**4.19**) es que el coeficiente de $t^{-1/2}$ viene dado enteramente en términos de las constantes fundamentales *h, c* y *G*. No depende en absoluto de las condiciones iniciales. (Esto es así porque hemos despreciado *k.)* Suponiendo que $\mathcal{N}$ no difiere mucho de la unidad, y utilizando (**4.16**), obtenemos:

$$\lambda/r_S \lesssim (t_P/t_H)^{1/2} \sim 10^{-30}, \qquad (4.20)$$

donde hemos hecho $a = 1$ y $t = t_H$, según corresponde a nuestra época. Así pues, volvemos a obtener (**4.18**) como un caso especial de la coincidencia de los grandes números (**4.6**).

En resumen, podemos expresar el misterio fundamental de la delicada disposición del Universo como sigue: ¿por qué el Universo es tan extraordinariamente mayor que una longitud de onda típica de su radiación calorífica primitiva?

El parámetro *k* es unas 60 potencias de 10 menor que el valor “natural” determinado por la longitud de Planck. Parece entonces razonable sospechar que hay un principio de simetría que hace que

k sea *exactamente* cero. De hecho, algunos autores han intentado relacionar la condición $k = 0$ con el principio de Mach (página 147). Pero sabemos que *k* no puede ser exactamente cero, ya que en tal caso no existirían las galaxias: la curvatura del espacio a la escala relativamente pequeña de los cúmulos de galaxias no es cero. Sólo a escala cosmológica es en promedio prácticamente cero. Es difícil imaginar un principio que haga que *k* sea en promedio tan pequeña, pero lo suficientemente grande localmente para permitir la formación de galaxias.

4.3 COOPERACIÓN SIN COMUNICACIÓN

Ya hemos mencionado en varias ocasiones que el Universo es extraordinariamente uniforme a gran escala. A la escala de las galaxias hay un considerable grado de agrupamiento en la distribución de la materia y una cierta dispersión en los movimientos. Pero a una escala de, digamos, 10^{24} m o mayor, la distribución es homogénea e isótropa en un grado muy elevado.

Una de las mejores pruebas de la isotropía es la medida de la radiación de fondo en microondas. Las observaciones actuales establecen límites de una parte en 10^4 sobre la variación de la temperatura con la orientación. A menos que ocupemos un lugar privilegiado en el Universo, debemos admitir que esta isotropía existe en todas partes, lo cual implica homogeneidad. También implica que la expansión cosmológica es homogénea e isótropa.

¿Por qué el Universo es tan uniforme que basta considerar un grado de libertad, $a(t)$, para describir su dinámica global? Una respuesta es que, simplemente, fue creado de esta forma. Es decir, que el Universo es tal como es porque así ha sido siempre. Pero esto difícilmente puede considerarse una buena explicación.

El misterio se vuelve más profundo cuando tenemos en cuenta el horizonte de partículas. En la sección anterior mencionamos que el horizonte crece a la velocidad de la luz. Extrapolando hacia atrás en

el tiempo hasta el Universo primitivo nos encontramos con que en el tiempo de Planck el radio del horizonte era solamente de 10^{-35} m (la longitud de Planck), y abarcaba unos 10^{-8} kg de materia. Hoy, aquel volumen de espacio ha crecido hasta los 10^{-15} m^3.

El horizonte separa las regiones del espacio que están conectadas causalmente. Una región que esté fuera del horizonte de otra no puede saber lo que está ocurriendo en ésta y viceversa. En consecuencia, no hay razón alguna para suponer que el Universo primitivo cooperara en su funcionamiento a longitudes mayores de 10^{-35} m. En particular, no existe ninguna razón física por la cual el ritmo de expansión debiera ser el mismo en regiones separadas por más de 10^{-35} m. Pero entonces cabría esperar que en la actualidad el Universo fuera caótico a escalas de longitud ~ 10^{-5} m, o que mostrara algún indicio de disipación de este caos en la época $t > t_P$, cuando las regiones vecinas entraron en contacto causal.

El Universo que observamos actualmente estuvo dividido causalmente por el horizonte en no menos de 10^{80} regiones en la época de Planck. Sin embargo, como ya hemos señalado, el Cosmos presenta un aspecto extraordinariamente uniforme. Y esto es válido *incluso* para regiones que en la actualidad están desconectadas causalmente.

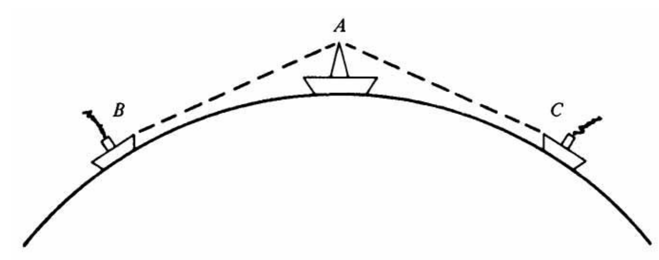


Fig. 13. Los horizontes del barco. Un observador en *A* puede ver tanto a *B* como a *C*, si bien *B* no puede ver a *C* y viceversa. De forma parecida, en cosmología podemos ver galaxias lejanas que no pueden verse entre sí. Estas galaxias no han estado nunca en contacto causal y, sin embargo, su aspecto y su conducta son idénticos.

Podemos ilustrar esta situación mediante una analogía (**fig. 13**). Imaginemos un barco *A* en medio del océano. Un marinero situado en lo alto del palo mayor divisa otro barco *B* que acaba de aparecer por el horizonte hacia el oeste. Simultáneamente observa un tercer barco *C* que aparece por el horizonte en dirección este. Si bien tanto *B* como *C* están al alcance visual de *A*, *B* no puede ver a *C* y viceversa. Ambos están por debajo del horizonte del otro.

Lo mismo podemos decir sobre el horizonte cosmológico. Podemos ver galaxias en direcciones opuestas de la esfera celeste y concluir que, dada su proximidad a nuestro horizonte, ambas están por debajo del horizonte de la otra y no pueden “verse” entre sí. Y, sin embargo, las galaxias que están en estas regiones del Universo causalmente inconexas —regiones que nunca han tenido ninguna clase de contacto físico mutuo— tienen un aspecto extraordinariamente similar. Además, las galaxias pueblan estas regiones inconexas con la misma densidad y se alejan de sus vecinas con la misma velocidad. ¿Cómo podemos explicar un grado de cooperación tan extraordinario sin ningún tipo de comunicación?

Es difícil resistirse a la idea de que hay algo —alguna influencia capaz de trascender el espacio-tiempo y las restricciones de la causalidad relativista— que tuvo una visión general de la totalidad del Cosmos en el instante de su creación y que manipula todas las partes causalmente inconexas para que se expandan por igual en cada instante, pero no de una forma tan exactamente coordinada que impida la formación de aquellas irregularidades a pequeña escala que originaron las galaxias y a nosotros mismos.

Una posible explicación es suponer que el Universo se inició en condiciones de muy poca uniformidad, con movimientos caóticos y turbulentos y una disposición muy desigual de la materia y la energía. Después, a medida que aumentaba la expansión, se fue disipando el caos primitivo y apareció la distribución uniforme de materia y de movimientos que observamos en la actualidad. Es posible

pensar en varios mecanismos de disipación: por ejemplo la conversión de la turbulenta energía gravitatoria en materia mediante la creación de pares partícula–antipartícula.

Se ha trabajado mucho en la investigación de la teoría de la disipación del caos primitivo. Es evidente que la producción de partículas a partir de la energía turbulenta constituye un proceso importante. Pero todavía no se ha descrito ningún mecanismo capaz de explicar el grado de uniformidad actual. Siempre es posible encontrar turbulencias iniciales que no pueden eliminarse totalmente. Y algunos movimientos anisótropos tienden a surgir de nuevo cuando se han amortiguado.

Otro problema que presenta la disipación del caos primitivo es la excesiva cantidad de calor que produce. Todos los efectos de amortiguamiento y de fricción producen calor, y en consecuencia entropía. La mayor parte del calor cósmico está contenida en la radiación de fondo de microondas a 3K, y esto limita el grado de turbulencia disipada en el Universo primitivo.

Podemos ilustrar la dificultad fundamental considerando la presencia de pequeñas cantidades de anisotropía en un Universo uniforme. En tal caso todavía podemos describir aproximadamente la expansión mediante un factor de escala promedio *a(t),* pero las ecuaciones gravitatorias contienen un término adicional debido a la mayor complejidad de la geometría. Este término es proporcional a a^{-6}. Podemos reescribir (4.13) en la forma:

$$\mathring{a}^2/a^2c^2 + k/a^2 = 8\pi G\varrho/3c^4 + A/a^6, \qquad (4.21)$$

donde *A* es una constante, y tratar la anisotropía como un tipo de energía turbulenta que hay que tener en cuenta “junto con la densidad de energía de la materia. Dado que $\varrho \propto a^{-4}$ es evidente que la anisotropía domina la dinámica en las primeras etapas (cuando *a* es pequeño). Si despreciamos los términos donde aparecen *k* y ϱ en **(4.21)** obtenemos la solución $a \propto t^{1/3}$, en vez de $a \propto t^{1/2}$ que se obtiene con el modelo isotrópico sencillo.

La importancia del factor a^{-6} asociado con la energía de la anisotropía estriba en que crece más rápidamente que el factor a^{-4} asociado con la energía calorífica ϱ cuando $a \rightarrow 0$. Así pues, cuando la anisotropía se convierte en calor, la cantidad de éste que se obtiene por cantidad dada de anisotropía es mayor cuanto más pronto se transforma. Dicho de otra forma, la energía de la anisotropía disminuye más rápidamente que la energía calorífica a medida que el Universo se expande. Cuanto antes se convierta en energía calorífica, mayor será el efecto de la anisotropía primitiva.

¿Qué estimación realista podemos hacer sobre cuándo se disipó la anisotropía en forma de calor? Los mecanismos de amortiguación que hemos examinado son más eficientes en las épocas primitivas. Pero entonces es cuando se libera más cantidad de calor a partir de una menor cantidad de anisotropía. Si la disipación se hubiera producido en la era de Planck (que es la época en que se producen efectos de creación de partículas en mayor cantidad), entonces incluso una anisotropía de una parte en 10^{40} hubiera producido demasiado calor. Dicho de otra forma, la temperatura actual del Universo requiere que el ritmo de expansión en la era de Planck fuera el mismo en todas direcciones con una exactitud de una parte en 10^{40}. He aquí otro asombroso ejemplo de "conspiración cósmica".

Los argumentos expuestos dependen de que tengamos una medida significativa del calor cósmico (entropía). Podemos medir la densidad de energía calorífica de fondo, pero para construir una unidad de calor necesitamos un volumen fundamental de espacio. Un volumen tal nos lo proporciona la materia ordinaria. La densidad media de protones en el Universo es de alrededor de uno por metro cúbico, de manera que un metro cúbico es un volumen natural a utilizar.

En lugar de tratar de la energía calorífica por metro cúbico, que varía con la época al expandirse el Universo, es más apropiado utilizar el número de fotones de radiación calorífica por protón, que es básicamente independiente del tiempo. El cociente fotón/protón *S* ya

fue introducido en el apartado 1.1; su valor es aproximadamente 10^9. La pequeñez de *S* (en comparación con 10^{40}) impone una severa restricción sobre la anisotropía inicial.

El parámetro *S* sólo tiene valor si el número de protones del Universo permanece constante. Ya dijimos en el **apartado 4.1** que ciertas teorías modernas sobre las fuerzas fundamentales predicen la inestabilidad del protón. Si el número de protones (o, más estrictamente, el número de bariones) no es una cantidad que se conserva, entonces el cociente fotón/protón pierde su importancia. En los modelos del Universo que tienen en cuenta tales efectos no es posible utilizar el razonamiento anterior para imponer restricciones a la anisotropía a partir de la radiación de fondo de 3°K.

4.4 LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO

Uno de los parámetros cósmicos fundamentales es *S*, el cociente fotón/protón. La densidad de entropía de la radiación calorífica es proporcional a la densidad de fotones, de manera que *S* es también una medida de la entropía por protón en el Universo. Como ya dijimos en la sección anterior, esta entropía pudo haberse producido como resultado de la disipación de la turbulencia en el Universo primitivo, si bien es difícil entender por qué *S* es tan pequeño.

La entropía total del Universo es algo mayor que la de los fotones. Es muy posible que existan otras formas de radiación en el Universo además de la electromagnética: por ejemplo neutrinos y gravitones. Es de esperar que los neutrinos primitivos bañen todo el Universo, ya que antes de 10^{-3} s los neutrinos habían estado acoplados con la materia y por consiguiente con los fotones a través de las reacciones discutidas en el **apartado 3.1**. Esto garantizó el equilibrio térmico, manteniendo a los fotones y a los neutrinos a la misma temperatura. Después del desacoplamiento de los neutrinos, la temperatura de los fotones subió un poco por el aniquilamiento de los

muones y los positrones. Según los cálculos, la temperatura actual del fondo de neutrinos es de unos 2°K.

Si existen tres clases diferentes de neutrinos, la entropía neutrínica será comparable con la entropía de los fotones. Es posible aplicar un argumento similar a los gravitones. Sin embargo, dado que la radiación de fondo de neutrinos y gravitones no podrá ser detectada en un futuro inmediato por deficiencias tecnológicas, tenemos que conformamos con indicios indirectos de su existencia (véase **apartado 3.1**).

A primera vista puede parecer sorprendente que S sea independiente del tiempo, dado que continuamente se crean y absorben fotones. En particular, la emisión de las estrellas incrementa continuamente el contenido fotónico del Universo.

Para investigar el tema de la acumulación de luz estelar podemos utilizar los resultados de los **apartados 2.3** y **3.3**. El número de estrellas del Universo observable es $\sim N/N_*$, y cada una de ellas tiene una luminosidad media L de $\sim \sigma c T_S^4 R^2$ y $kT_S \sim 0{,}1\ e^4 m_e/16\pi^2\varepsilon^2 h^2$, como explicamos en el **apartado 3.3**. La vida media de las estrellas es $t_* \sim t_H$ (véase **ecuación 2.30**), mientras que el radio R viene dado por $\sim \hbar^2/G m_P^2 m_e N_*^{1/3}$, según lo dicho en relación con la ecuación (**2.14**). Combinando todos estos factores y utilizando (**4.10**), obtenemos el número total de fotones de la luz estelar:

$$10^{-3}(m_e/m_P)\alpha^6\alpha_G^{-1/2}N \sim 10N \qquad (4.22)$$

que podemos comparar con el número de fotones procedentes de la radiación calorífica primitiva $\sim SN \sim 10^9 N$. Es evidente que los fotones de la luz estelar son mucho más escasos. Sin embargo, su energía es $\sim 10^4$ veces mayor, de manera que la densidad de energía de la luz estelar acumulada no es muchos órdenes de magnitud menor que la densidad de energía de fondo primitiva.

El cociente S tiene una gran influencia en la estructura del mundo físico. Si S fuera 10^7 veces mayor, la temperatura del espacio estaría en la actualidad por encima del punto de ebullición del agua. No

podría existir agua líquida en el Universo hasta que la expansión cosmológica redujera apreciablemente la temperatura de fondo. Esto tardaría varios tiempos de Hubble, pero entonces la mayor parte de las estrellas de tipo solar ya se habrían consumido (si es que se hubieran podido formar).

Y, lo que es aún más importante, un pequeño incremento en el valor de S hubiera puesto en peligro la existencia de las galaxias. Como ya discutimos en el **apartado 3.4**, las galaxias se formaron a partir del crecimiento de las perturbaciones de densidad en los distintos gases primitivos. Este proceso no se inició hasta que la dinámica gravitatoria del medio cosmológico estuvo dominada por la materia, y no por la radiación. ¿Cuándo ocurrió esto?

La densidad de energía de los fotones es $n_\gamma kT$, donde n_γ es su densidad numérica. Análogamente, la densidad de energía de la materia (fundamentalmente protones) es $n_P m_P c^2$. La igualdad tiene lugar cuando $kT \simeq m_P c^2/S$. Utilizando (**4.19**) para eliminar T llegamos a la conclusión que:

$$t_{\text{igual}} \sim S^2 \alpha_G^{-1/2} t_N \sim 10^{13} \text{ s.} \qquad (4.23)$$

Hay otro requisito que debe satisfacerse antes de que las galaxias puedan iniciar su crecimiento. Mientras la temperatura del Universo estuvo por encima de la temperatura de ionización del hidrógeno, el material cósmico era opaco a la luz, y en consecuencia estaba sujeto a una intensa presión de radiación que impedía la rápida contracción gravitatoria. Una vez la temperatura descendió por debajo de aproximadamente $0{,}1e^4 m_e/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2 k$, la materia y la radiación se desacoplaron al hacerse los gases transparentes.

Para calcular el tiempo del desacoplamiento de materia y radiación observamos que, después de t_{igual}, el factor de escala de la expansión sigue la ley (**1.16**). La temperatura de la materia, sin embargo, desciende al mismo ritmo que la temperatura de la radiación ($T \propto a^{-1} \propto t^{-2/3}$) en tanto aquélla permanezca ionizada y por tanto

acoplada a la radiación calorífica. Así pues, suponiendo que la época de desacoplamiento es tal que $t_{desac} > t_{igual}$,

$$T(t)/T(t_{igual}) = (t_{igual}/t)^{2/3}.$$

Utilizando (**4.23**) para t_{igual} y $m_P c^2/kS$ para $T(t_{igual})$, despejamos fácilmente t. Tomamos $kT(t) \sim 0{,}1e^4 m_e/16\pi^2\varepsilon^2\hbar^2$, con lo cual t toma el valor:

$$t_{desac} \sim 10S^{1/2}\alpha_G^{-1/2}\alpha^{-3}(m_P/m_e)^{3/2}t_N \sim 10^{13} \text{ s.} \qquad (4.24)$$

Esta coincidencia numérica, $t_{igual} \sim t_{desac}$, ha sorprendido a los astrónomos durante algún tiempo. Se debe a que el cociente fotón/protón es:

$$S \sim 10\alpha^{-2}(m_P/m_e). \qquad (4.25)$$

La relación (**4.23**) es muy sensible al cociente S. Si S hubiera sido menor que 10^3, entonces t_{igual} hubiera disminuido hasta un instante, alrededor de 1 s, anterior al inicio de la nucleosíntesis primitiva. Un Universo dominado por la materia y no por la radiación se expande a un ritmo diferente y produce una relación hidrógeno–helio muy distinta. Por otra parte, si S fuera mayor que 10^{11}, por ejemplo, el Universo permanecería dominado por la radiación y en consecuencia sin galaxias, hasta la época actual.

Es evidente que algunas características básicas de nuestro Universo dependen de que $10^3 < S < 10^{11}$. Pero, ¿qué determina el valor de S?

Tras el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo en 1965, muchos astrónomos y cosmólogos supusieron que el valor de su temperatura (3°K) era un número arbitrario sin mayor significado que el que pudiera tener el número de planetas del Sistema Solar. Algunos autores señalaron que S era aproximadamente la raíz cuarta del famoso número 10^{40}, (véase **ecuación 4.8**), pero la incertidumbre

de este pequeño valor (comparado con 10^{40}) hizo que esta aparente coincidencia numérica tuviera menos relevancia que las otras ya discutidas.

En lugar de suponer que S es sólo un reflejo de las condiciones iniciales, podemos argumentar que la entropía que representa se produjo de alguna forma durante la fase primitiva debido a ciertos procesos disipativos. Esto es, que el Universo empezó con, digamos, $S \sim 1$, y que la posterior generación de calor hizo que este valor creciera hasta 10^9. En tal caso sería posible calcular el valor observado de S a partir de los detalles de los procesos disipativos.

En el apartado 4.3 ya discutimos el ejemplo de la amortiguación de la anisotropía. Entre otros ejemplos se cuentan la disipación del sonido (el ruido del *Big Bang* convertido en calor), efectos viscosos y transiciones de fase entre estados de la materia supercalientes. Martin Rees ha propuesto un complicado modelo en el que interviene una generación de grandes estrellas pregalácticas que se formaron y consumieron rápidamente (antes de t_{desac} y t_{igual}) y cuya enorme producción de calor fue termalizada por los gases cósmicos que todavía estaban ionizados. Si suponemos que la vida media de una estrella típica de gran masa (dada por **2.28**) es igual a t_{igual} (dada por **4.23**), obtenemos efectivamente (**4.8**).

Recientemente se ha abierto un camino mucho más fundamental hacia el conocimiento del valor de S. El misterio de por qué la naturaleza creó, en el *Big Bang*, 10^9 fotones por cada protón, en realidad no es más que una parte del misterio aún mayor de cómo se crearon los propios protones. En el laboratorio se producen protones de forma sistemática en las colisiones de alta energía entre partículas subnucleares, pero en cada caso la aparición de un protón viene acompañada por la de un antiprotón (o una partícula que se desintegra rápidamente en un antiprotón). Nunca se pueden producir protones solos. Los físicos han introducido una magnitud, llamada número bariónico, que da cuenta de este fenómeno. El protón y muchas partículas pesadas tienen número bariónico +1, el antiprotón –1. La

ley de conservación del número bariónico exige que cada protón creado compense su número bariónico acompañando a otra partícula de número bariónico –1. Algo semejante se aplica a los leptones: un electrón debe ir acompañado por un positrón. La aparición simultánea de un electrón y un protón, por ejemplo, está prohibida por las leyes de conservación tanto del número bariónico como del número leptónico.

Parece razonable suponer que estas leyes de conservación también rigieron la creación de materia en el *Big Bang*. En tal caso, por cada protón producido debió crearse el correspondiente antiprotón, y por cada electrón el correspondiente positrón. Cuando un protón se encuentra con un antiprotón, o un electrón con un positrón, ambos se aniquilan mutuamente. Así pues, las partículas primitivas, mezcladas a elevadas densidades con sus antipartículas, debieron tener una existencia muy corta. Ahora bien, a las elevadas temperaturas reinantes en la gran explosión, debieron producirse muchos nuevos pares partícula–antipartícula que compensaron el agotamiento por aniquilación. En las condiciones de equilibrio térmico que probablemente dominaron durante la mayor parte del período comprendido entre 10^{-35} s y 10^{-6} s los procesos opuestos de creación de pares y de aniquilación debieron compensarse con exactitud. En tal caso, es muy fácil calcular las poblaciones de equilibrio de las diferentes clases de partículas. Los fotones, fácilmente transformables en pares partícula–antipartícula, debieron ser escasos. En el tiempo 10^{-6} s casi todas las partículas debieron ser protones, neutrones, electrones, muones, piones y sus antipartículas; sólo había una pequeña cantidad de fotones.

Una vez que la temperatura descendió por debajo de $2m_P c^2/k$, la energía calorífica fue incapaz de mantener a los protones y antiprotones, de manera que su rápida aniquilación dejó de estar en equilibrio con su creación.

Más tarde, aproximadamente en el tiempo de 1 s, el resto de las partículas experimentaron la misma suerte. Casi toda la energía de

la masa en reposo de estas partículas y antipartículas se convirtió en neutrinos y fotones. La abundancia relativa de fotones aumentó bruscamente.

Es evidente que unos pocos protones y electrones lograron escapar de la aniquilación. Si aceptamos que cada par protón–antiprotón aniquilado dio origen a un fotón, entonces el valor actual de $S \sim 10^9$ indica que solamente un protón (o un electrón) de cada mil millones pudo escapar a la aniquilación. Pero ahora se nos plantea un gran interrogante: ¿dónde están los antiprotones y los positrones que también lograron escapar? Si las leyes de conservación bariónica y leptónica han sido siempre respetadas, cada partícula del Universo debe tener, en alguna parte, su correspondiente antipartícula.

Tradicionalmente se han dado dos respuestas a esta pregunta. La primera es que, efectivamente, las antipartículas existen, que el Universo es una mezcla de materia y antimateria. La objeción más seria a esta respuesta es que una mezcla así sería altamente inestable, ya que cualquier encuentro entre las dos acaba con su aniquilación explosiva. Si esto ocurriera a menudo en nuestra Galaxia se produciría una radiación de fondo de rayos gamma que nunca se ha observado. Las estimaciones de Gary Steigman establecen un límite superior a la cantidad de antimateria en nuestra Galaxia: sólo una parte en 10^9.

Esta dificultad se puede superar si admitimos que hay una gran separación espacial entre materia y antimateria, separación que ha dado lugar a la formación de galaxias enteras constituidas predominantemente de una u otra. Sin embargo, también se producen colisiones galácticas de vez en cuando y los datos que se tienen sobre la radiación gamma nos obligan a admitir que la separación se da entre los cúmulos galácticos más que entre las galaxias.

Un Universo simétrico con respecto a la materia y a la antimateria, si bien tiene su atractivo estético, resulta muy poco convincente, sobre todo si consideramos que no se ha propuesto ningún mecanismo capaz de dar cuenta de la enorme separación entre ambos

componentes. Pero la otra alternativa parece igualmente insatisfactoria. Esta alternativa consiste en admitir simple y llanamente que el Universo es asimétrico, que no hay cantidades importantes de antimateria. El Universo se creó con un pequeño exceso de materia (alrededor de una parte en 10^9) y precisamente a partir de este residuo del *Big Bang* se han formado las galaxias, y nosotros mismos.

Según este modelo, el contenido bariónico y leptónico de nuestro Universo es una condición inicial: algo impreso en el Cosmos desde el momento de su creación y que no admite ninguna explicación racional basada en la teoría física. Así, el cociente fotón/protón, *S*, que refleja el exceso inicial de la materia sobre la antimateria, es un número elegido por la naturaleza en el principio, al igual que, por ejemplo, el cociente m_P/m_e. No sabemos por qué *S* tiene este valor en particular; sólo sabemos que si fuera otro la estructura del Universo sería muy distinta: de nuevo estamos ante la enojosa evasiva de que el mundo es así porque así ha sido.

Pero hay una idea mucho más atractiva que se basa en los intentos recientes de unificar las fuerzas débil, electromagnética y fuerte en una llamada teoría de gran unificación (GUT). Estas teorías, como ya mencionamos brevemente en el **apartado 4.1**, predicen que el protón puede desintegrarse, dando en último término un positrón. Con esto se violan las leyes de conservación del número bariónico y del número leptónico. Queda así abierto el camino para la creación de materia sin una cantidad igual de antimateria.

La razón de que estas leyes hasta ahora sacrosantas pueden ser violadas se encuentra en la naturaleza de los quarks y de los leptones. Muchos físicos creen que estas partículas son realmente fundamentales y que es razonable preguntarse sobre la relación que hay entre ellas. Existen probablemente seis variedades de cada una. Los quarks están sujetos a la interacción fuerte, mientras que los leptones sólo experimentan las interacciones débil y electromagnética. Sin embargo, en las teorías unificadas la distinción entre estas interac-

ciones, hasta ahora consideradas muy distintas, desaparece. También queda un tanto difuminada la diferencia entre leptones y quarks, lo cual permite que un protón (formado por quarks) pueda transformarse en un positrón (un leptón).

A temperaturas elevadas, la distinción tanto entre las tres fuerzas como entre quarks y leptones desaparece por completo. La materia entra en una fase nueva y amorfa. Las temperaturas correspondientes son enormes, unos 10^{28} - 10^{30} °K, temperaturas a las cuales la energía térmica media kT no está muy lejos de la energía–masa de Planck. Estas temperaturas debieron prevalecer antes de los 10^{-35} s después del inicio del *Big Bang*, época en que la relación entre materia y antimateria debió haberse alterado de manera drástica.

Según la teoría, la única fuerza unificada que controlaba todas las interacciones (dejando aparte la gravedad) era transmitida por partículas superpesadas que cumplían un papel similar al desempeñado por fotones, gluones, W_S y Z_S. A medida que la temperatura descendía, las partículas superpesadas se desintegraban en las conocidas partículas ligeras. Pero debido a la posibilidad de la no conservación bariónica, los productos de las desintegraciones pudieron haber tenido una ligera preponderancia de materia sobre la antimateria, tal vez el cociente necesario $1 + 10^{-9} : 1$ que, tras la aniquilación de toda la antimateria, dio origen a $S \sim 10^9$.

Lo que atrae realmente de este modelo es que nos proporciona la oportunidad de calcular el parámetro cósmico fundamental S a partir de la física básica —la física de las GUTs. Unos cuantos físicos lo han intentado. Sus resultados son en general de la forma:

$$S \sim (\text{cocientes entre masas de los quarks}) \times (m_P/m_X)\ , \qquad (4.26)$$

donde m_X es la masa de las partículas superpesadas. Poniendo los números correspondientes se obtienen en la práctica estimaciones del valor de S que coinciden con el valor conocido salvo un orden de magnitud.

Si estas ideas son correctas, resulta que las características importantes del Universo que dependen de $S \sim 10^9$ —como la existencia de galaxias o que la relación hidrógeno/helio sea 4— son consecuencia de los valores tomados por los parámetros fundamentales de la GUT, tales como las masas superpesadas. Si éstos hubieran sido ligeramente distintos, el Universo sería muy diferente. En particular, si $m_X \ll m_P$ el Universo estaría extraordinariamente caliente y no contendría galaxias.

4.5 REPULSIÓN CÓSMICA

Hasta el momento hemos ignorado el término Λ en las ecuaciones gravitatorias. Como dijimos en el capítulo 1, no hay ningún indicio observacional de que Λ sea diferente de 0. En el **apartado 1.2** vimos que Einstein introdujo esta llamada constante cosmológica para construir un modelo de Universo que fuera estático. (Esto fue antes del descubrimiento de Hubble de la expansión del Universo.) Para ello hubo de proponer una fuerza capaz de contrarrestar la atracción gravitatoria entre las estrellas, y esto lo logró con un término Λ en las ecuaciones del campo gravitatorio.

Desgraciadamente para Einstein, su modelo estático de Universo, que resultó ser cerrado espacialmente y de volumen finito, es inestable. Cualquier pequeña perturbación desencadenaría su desplome o su expansión a un ritmo acelerado: Einstein renunció a su constante. El posterior descubrimiento de la expansión cosmológica eliminó la necesidad de un modelo estático de Universo, y con ello la necesidad del término Λ. La influencia de esta desafortunada experiencia inicial con Λ llevó a muchos cosmólogos a creer, por razones estéticas, que había que ignorarla, o, lo que es lo mismo, que Λ debía ser estrictamente cero.

En la actualidad, la situación ha cambiado radicalmente. En el capítulo 1 ya mencionamos que Λ tiene el efecto de una fuerza repulsiva que actúa en todo el espacio vacío. El concepto actual de espacio vacío es muy complejo. De acuerdo con la teoría cuántica, el vacío —la ausencia total de partículas— no equivale a inactividad: incluso el vacío más perfecto está lleno de fuerzas y de campos.

El principio de incertidumbre de Heisenberg $\Delta E \Delta t \sim$ h permite "tomar prestada" una cantidad de energía ΔE durante un tiempo Δt. Si Δt es lo suficientemente corto, esta energía se puede utilizar para producir las llamadas partículas virtuales, que a su vez desaparecen rápidamente para devolver el préstamo. Éste es el mecanismo que explica la transmisión por medio de un "mensajero" virtual de las fuerzas entre partículas, mecanismo discutido en el **apartado 1.3**. Pero las partículas virtuales pueden aparecer incluso en ausencia de partículas que originen fuerzas. En consecuencia, el estado de vacío contiene cantidades ilimitadas de estas partículas de corta vida que, si bien tienen una existencia fugaz, pueden interactuar e intervenir en complejos procesos. Este conjunto fluctuante de partículas ejerce una influencia gravitatoria del mismo tipo que la de la materia ordinaria.

Es posible calcular la energía de este complejo estado de vacío. Los cálculos son engorrosos debido a la aparición de cantidades infinitas que deben soslayarse para obtener resultados significativos. La energía total del vacío proviene de la contribución de todas las partículas concebibles en la naturaleza —electrones, protones, fotones, *W*S, gluones, etc. La mayor parte de las contribuciones son muy claras, pero una clase muy importante de partículas, llamadas escalares, actúan de forma más complicada. Las partículas escalares virtuales pueden formarse de varias maneras diferentes, y los correspondientes estados de vacío difieren mucho en energía: en un caso típico este valor es de 10^{25} kg m^{-3}. Un principio físico muy general establece que un sistema siempre busca su estado de menor energía, y esto también vale en el vacío. Los estados de mayor energía son

inestables y probablemente pasan muy rápidamente al estado de mínima energía.

Esta energía del vacío hace su contribución a Λ. El comportamiento dinámico del vacío es indistinguible del término cosmológico en las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein. Así pues, debemos añadir a la Λ ordinaria (a veces llamada "pura") la corrección cuántica del vacío. La cantidad total es la que observamos realmente en la naturaleza. Y aquí viene lo asombroso. Las contribuciones cuánticas a Λ son típicamente *cincuenta* órdenes de magnitud mayores que el límite máximo impuesto por las observaciones al valor real. Es evidente que la Λ pura y la Λ cuántica son tales que se cancelan prácticamente con una exactitud de menos una parte en 10^{50}. Debemos suponer que, para obtener un valor menor que 10^{-53} m^{-2} (el límite superior observado), la contribución del vacío de, por ejemplo 10^{-2} m^{-2} tiene signo opuesto a la Λ pura y un valor que se ajusta a ella con extraordinaria precisión.

La magnitud de la contribución cuántica a Λ viene determinada por los parámetros microfísicos que intervienen en la teoría de campos considerada. Por ejemplo, las partículas escalares en la teoría de Weinberg–Salam de la fuerza electrodébil tienen una contribución de:

$$\Lambda_q = -\pi G m_{\varnothing}^2/\sqrt{2}\, c^4 g_W \sim -10^{-2}\ m^{-2},$$

donde $m_{\varnothing}$ es la masa de las partículas escalares. Pero:

$$\Lambda_{pura} + \Lambda_q < 10^{-53}\ m^{-2}.$$

Si G o g_W difirieran de su valor real en tan sólo una parte en 10^{50} se rompería el equilibrio con Λ_{pura} y la estructura del Universo se alteraría drásticamente. Además, en el caso de las llamadas teorías de gran unificación la precisión del ajuste se debe llevar hasta menos de una parte en 10^{100}.

¿Qué efecto tendría un valor de Λ mayor que 10^{-53} m^{-2}? Recordando que Λ origina una fuerza que se opone a la gravedad, y cuya magnitud crece con la distancia, la existencia de un término Λ, por pequeño que sea, en un Universo en continua expansión implica que finalmente la materia estará tan diluida que la fuerza repulsiva será predominante. Cuando esto ocurra, el Universo empezará a expandirse de forma cada vez más rápida.

La presencia del término Λ modifica la ecuación (**4.13**) de la siguiente manera:

$$\mathring{a}^2/a^2c^2 + k/a^2 - \Lambda = 8\pi G \models/3c^4. \qquad (4.27)$$

Es evidente que cuando *a* es pequeño podemos despreciar Λ, como ya hicimos al considerar el Universo primitivo. Pero cuando *a* es grande, los efectos de Λ superan los de los otros términos. Despreciando los términos *k* y g, la ecuación (**4.27**) tiene por solución:

$$a \propto \exp(c\Lambda^{1/2}t)\,, \qquad (4.28)$$

esto es, el Universo se hincha exponencialmente. La curva de la **figura 3** deja de tener validez. En lugar de curvarse de manera continua hacia abajo se curva hacia arriba a un ritmo acelerado.

En el caso $\Lambda < 0$, la fuerza Λ en realidad coadyuva con la gravedad y el Universo se contrae, en una escala de tiempo $\sim 1/c\Lambda^{1/2}$.

La ausencia de signo alguno de crecimiento exponencial o de recontracción permite a los astrónomos establecer un límite al valor de Λ. Si Λ fuera 10 veces mayor, el tipo de expansión del Universo sería muy diferente. Pero si Λ fuera varios órdenes de magnitud mayor, la expansión del Universo sería explosiva y es muy improbable que se hubieran podido formar las galaxias en presencia de una fuerza tan repulsiva. Si Λ fuera negativa, en lugar de la explosión tendríamos el desplome catastrófico del Universo. Es realmente extraordinario que una simple variación de menos de una parte en 10^{40}

en la gravedad o en la fuerza débil pueda surtir efectos tan espectaculares.

Podríamos suponer que el ajuste tan perfecto entre Λ_q y Λ_{pura} es indicio de un nuevo principio fundamental que hace que Λ sea estrictamente 0, tal como deseaba Einstein. En lugar de atribuir la pequeñez de Λ a la cancelación accidental de cantidades muy grandes, podemos considerarlo como un principio básico de la física, una propiedad de la naturaleza.

Si bien en la actualidad la constante cosmológica es indistinguible de 0, los trabajos recientes en las teorías de gran unificación parecen indicar que durante la fase primitiva de elevadas temperaturas la energía del vacío fue muy diferente, dando temporalmente un valor muy grande a Λ. Algunos cosmólogos creen que, en realidad, esta fuerza repulsiva fue la causa del *Big Bang*. Dicen que alrededor del tiempo 10^{-35} s, el Universo inició una fase corta, pero significativa, de expansión, cuando A dominó sobre los efectos gravitatorios ordinarios y dio paso a una fase de Sitter de corta duración. Este modelo se conoce con el nombre de “Universo inflacionario”. Se espera que la inflación pueda ofrecer una explicación natural de la homogeneidad e isotropía del Universo y de por qué g es tan próxima a $\varrho_{crit.}$

5. Principio antrópico

El catálogo de extraordinarias coincidencias físicas y de cooperaciones aparentemente accidentales que hemos estudiado en los dos capítulos precedentes son un claro indicio de que "algo está pasando". En el **capítulo 4** mencionamos que parece haber un principio oculto que organiza el Cosmos de una manera coherente. ¿Cómo, sino, podemos explicar que la energía de expansión del Universo no sólo se ajusta a su poder gravitatorio para asegurar una supervivencia al menos 10^{60} veces mayor que su ciclo de tiempo natural, sino que se ajusta por igual en todas partes, incluso en regiones del espacio desconectadas causalmente? ¿Qué otra explicación podemos dar de la cancelación casi exacta que se produce entre Λ_q y Λ_{pura}, o de la ausencia total de anisotropía observable?

A pesar de la evidente necesidad de descubrir un principio cósmico en la física fundamental que sea capaz de dar razón de estas características "milagrosas", así como otras asombrosas coincidencias de la física microscópica que discutimos en el **capítulo 3**, no se ha propuesto nunca un tal principio. En cambio, el único intento sistemático de explicar científicamente la estructura compleja del mundo físico no ha provenido de la física fundamental, sino de la biología. La argumentación apela a una característica del Universo que a primera vista no parece pertinente: nosotros mismos.

Normalmente, en las ciencias físicas se pasa por alto al "observador". En general se acepta que nuestra presencia es circunstancial. Algunos científicos han puesto en duda este supuesto tradicional y afirman que la estructura del mundo físico es fundamentalmente inseparable de los habitantes que lo observan. Mantienen que es cierto que hay un principio que rige el Cosmos y que lo ajusta con extraordinaria precisión. Pero no es un principio físico, sino un principio *antrópico*.

5.1 CONSECUENCIAS PARA LA BIOLOGÍA

Los capítulos anteriores habrán convencido al lector de que la estructura del mundo físico depende en gran medida de un conjunto de aparentes accidentes numéricos. Muchas de las características fundamentales del Universo están determinadas por los valores que se asignan a las constantes fundamentales de la naturaleza —como G, m_P, α...— y estas características se alterarían si los valores de estas constantes fueran ligeramente distintos. Es evidente que la producción de un Cosmos como el nuestro requiere la estrecha cooperación de muchas ramas de la física aparentemente inconexas.

No podemos dejar de preguntarnos por qué, de entre el conjunto infinito de valores posibles que la naturaleza podía asignar a las constantes fundamentales, y de toda la infinita variedad de condiciones iniciales que podían haber caracterizado el Universo primitivo, los valores y condiciones reales han conspirado para producir el conjunto tan especial de características que observamos. Porque el Universo es un lugar muy especial: es extraordinariamente uniforme a gran escala, pero no tanto que no puedan formarse las galaxias; la entropía por protón es extremadamente pequeña, pero no tanto como para que no haya química; la repulsión cósmica es casi cero, y en cambio el ritmo de expansión se ajusta al contenido energético con una precisión increíble; los valores de las magnitudes de las fuerzas son tales que permiten la existencia de los núcleos y, sin embargo, el hidrógeno cósmico no se consume en su totalidad, y así muchos más productos aparentes de la Fortuna.

Muchos científicos han reparado en estas coincidencias. Tanto Eddington como Dirac quedaron muy impresionados por la aparición del número 10^{40} en contextos diferentes (véase el **apartado 4.1**) y propusieron teorías físicas muy complejas al respecto. Eddington intentó obtener el número 10^{40} a partir de principios físicos fundamentales nuevos, mientras que para Dirac este número depende en realidad del tiempo, de hecho $G \propto t^{-1}$. Más tarde, Pascual Jordán (y

el propio Dirac) trabajaron sobre esta teoría. Jordán intentó también explicar la relación (**4.3**) efectuando cambios radicales en la física convencional. Más recientemente Cárter ha hecho hincapié en la que él llama "extraordinaria coincidencia" de la relación (**3.9**), que establece que las estrellas típicas se encuentran entre las gigantes azules y las enanas rojas.

Lo que más ha impresionado a muchos de estos autores es el hecho de que nuestra propia existencia como organismos conscientes depende en gran medida de la estructura del mundo físico que percibimos. Mantienen que si una sola de las condiciones mencionadas en los capítulos anteriores variara, entonces la vida —al menos como nosotros la conocemos— no hubiera sido posible.

Según Cárter, «la existencia de un organismo describible como observador sólo es posible en ciertas combinaciones muy determinadas de los parámetros.» Para John Barrow, «nuestra existencia impone un riguroso efecto de selección sobre la clase de Universo que es factible observar.» En un artículo que comienza con la memorable sentencia «Existimos», D. V. Nanopoulos adopta la misma actitud ante el tema del cociente entre fotones y protones en el Universo; dice textualmente: «Nuestra existencia establece un límite muy estricto a este cociente.»

La observación de Cárter viene a decir que si los parámetros fundamentales tuvieran valores apreciablemente diferentes no estaríamos aquí para comentarlo. Pero lo que Barrow y Nanopoulos mantienen es más tajante, parecen decir que nuestra existencia *condiciona* la estructura del Universo, que incluso la "selecciona". Ésta es una idea sacada de las palabras de John Wheeler: «Aquí está el hombre, ¿cómo ha de ser, pues, el Universo?»

Bryce DeWitt es autor de una frase que se puede interpretar a favor de cualquiera de las dos alternativas; la frase es deliberadamente ambigua y contundente: «El mundo en que vivimos es el mundo en que *vivimos*.»

La introducción de la conexión humana en este contexto cósmico recibe el nombre de *principio antrópico*. Con el tiempo, el principio ha ido cambiando de significado. Antes de discutir sus diferentes interpretaciones es conveniente dar un ejemplo de un caso en que la importancia de nuestra existencia es innegable.

5.2 UNA EXPLICACIÓN DE LAS COINCIDENCIAS DE LOS GRANDES NÚMEROS

Una de las primeras demostraciones de cómo utilizar la biología para explicar una característica misteriosa del Universo físico la dio Robert Dicke. En 1961 afirmó que Eddington y Dirac se habían equivocado al buscar nuevos principios fundamentales de la física para explicar la aparente coincidencia (**4.10**): que la edad del Universo en unidades nucleares es del mismo orden de magnitud que el cociente entre las fuerzas eléctricas y gravitatorias entre dos protones.

Es evidente que la edad *actual* del Universo es la que corresponde a la existencia de la humanidad. La sociedad tecnológica, y con ella la medición de las constantes fundamentales que estamos discutiendo, solamente ha ocupado una minúscula fracción de la vida del Universo, de manera que podemos considerar que define un tiempo característico t_{presente}. El misterio es por qué t_{presente} tiene la misma relación numérica con t_N que la que tienen la fuerza eléctrica y la atracción gravitatoria entre protones.

Dicke argumenta que $\mathrm{t}_{\text{presente}}$ no es un instante de tiempo cualquiera elegido al azar, sino que está íntimamente ligado a las escalas temporales de ciertos procesos físicos que ocurren en el Universo y que son en sí mismos prerrequisitos para la existencia de vida inteligente y, por tanto, de tecnología. Podríamos imaginar toda una variedad de tales prerrequisitos, pero Dicke se limita a la existencia de elementos más pesados que el hidrógeno. La vida en la Tierra está

basada en el elemento carbono, el nitrógeno y el oxígeno. Estos elementos no existían en el Universo primitivo. Su presencia en cantidades razonables se atribuye a la nucleosíntesis que tiene lugar en el interior de las estrellas.

Durante el *Big Bang* las temperaturas fueron suficientemente elevadas para la síntesis de elementos pesados, pero sólo durante unos pocos minutos. Solamente se produjo en abundancia el elemento helio (irrelevante para la vida). Por otra parte, en el interior de las estrellas se consiguen temperaturas $\sim 10^7$ K o mayores durante períodos de miles de millones de años, con lo cual una gran parte del material estelar puede convertirse en elementos pesados. Para que estos elementos puedan constituir los fundamentos químicos de la vida han de dispersarse por toda la galaxia. Como ya explicamos en el **capítulo 3.1**, esto ocurre cuando una estrella llega al final de su vida y ha agotado su combustible nuclear. Si la masa de la estrella es grande, muy probablemente explotará como una supernova arrojando su contenido al espacio interestelar. Como dijo en una ocasión sir James Jeans, nuestros cuerpos están hechos de las cenizas de estrellas que murieron hace mucho tiempo.

De acuerdo con el razonamiento de Dicke, la vida no puede aparecer en el Universo hasta que al menos una generación de estrellas haya recorrido su ciclo vital, sembrando la galaxia con los restos de supernovas que contienen carbono. Por otra parte, el consumo del hidrógeno por las estrellas es irreversible, de manera que el ciclo no puede repetirse *ad infinitum*. Tras unas cuantas generaciones de estrellas se agotarán las provisiones de combustible nuclear de la galaxia, y la formación de nuevas estrellas (al menos de estrellas estables como el Sol) será cada vez más rara. Entonces la galaxia empezará a enfriarse y la vida será ya imposible.

Estas ideas nos llevan a suponer que sólo encontraremos vida en el Universo durante la época que va desde t_* a, digamos, $10t_*$, donde

t es la vida media de una estrella medianamente grande. En el **apartado 2.3** calculamos de forma aproximada esta cantidad. A partir de la ecuación (**2.28**) tenemos:

$$t_* \sim \alpha_G^{-1} t_N \sim 10^{40} t_N.$$

Si ahora identificamos $t_{presente}$ con t dentro de un orden de magnitud —ya que, como criaturas vivas que somos sólo podemos estar percibiendo el Universo durante la época que va de t_* a $10t_*$— entonces queda explicada una de las "coincidencias" de los grandes números. Como vemos no es ninguna coincidencia, ni ninguna manifestación de una física desconocida, sino una consecuencia directa de la física fundamental y de la biología.

Es evidente que hemos obtenido una explicación *biológica* de una característica fundamental de nuestro mundo allí donde la *física* ha fracasado. El hecho de que $t_{presente}$ sólo sea igual a t dentro de un orden de magnitud no es ninguna objeción importante a este argumento, ya que de cualquier forma las coincidencias entre los grandes números son también aproximadas, y éstos pueden tomar toda una variedad de valores dependiendo, por ejemplo, de si utilizamos la masa del electrón en lugar de la del protón. Pero estas diferencias son muy pequeñas comparadas con la enormidad del número 10^{40}. Lo sorprendente es el hecho de que t_*, *en* unidades de t_N, sea tan próxima a este número.

Es posible establecer un límite inferior a t mediante otro argumento que no hace referencia alguna a la escala temporal de la evolución estelar. Bernard Carr y Martin Rees han hecho notar que la vida depende de la existencia de las galaxias, y que éstas solamente pueden formarse después de las épocas t_{desac} y t_{igual} (véase **apartado 4.4**). Si aceptamos la teoría GUT que *predice* un cociente fotón/protón $S \sim 10^{10} \sim \alpha_G^{-1/4}$ basándose en la física fundamental (en lugar de considerar S como una condición inicial y por lo tanto parámetro libre) entonces la ecuación (**4.23**) nos da inmediatamente:

$$t_{\text{igual}} \sim \alpha_G^{-1} t_N$$

y en consecuencia $t_{\text{presente}} \gtrsim t_{\text{igual}} \sim 10^{40} t_N$.

Esta línea de razonamiento —que los observadores humanos seleccionan una posición en el espacio que puede ser atípica— es contraria al espíritu de la revolución copernicana. Nicolás Copérnico, al negar que la Tierra ocupara un lugar especial en la dinámica cósmica, inició una tradición muy influyente en el pensamiento científico durante cuatro siglos. En muchísimos aspectos podemos considerar que la Tierra no tiene nada de excepcional y no es más que un planeta típico entre un vasto número de planetas similares asociados a estrellas similares en galaxias similares. Pero nuestra existencia como organismos biológicos ha seleccionado una situación en el espacio que en cierto sentido es atípica. Si bien la Tierra no tiene ninguna condición especial entre los planetas, el hecho de que estemos viviendo sobre una superficie sólida, cuando la mayor parte del material del Universo está en forma de tenues nubes gaseosas o de bolas de plasma caliente, y el hecho de que estemos situados cerca de una estrella estable, cuando muchas estrellas tienen un comportamiento errático o están agrupadas en sistemas múltiples que no son aptos para tener planetas estables, no es ninguna coincidencia. Presumiblemente no podríamos sobrevivir en el entorno hostil asociado con el material cósmico típico. De igual manera, nuestra situación temporal en el Cosmos viene delimitada por el hecho de que el Universo *evoluciona,* y durante su evolución desde un horno caliente y denso hasta un conjunto de galaxias dispersas y agotadas, sólo un intervalo de tiempo relativamente corto es apto para la vida.

Se puede atacar la argumentación de Dicke en diversos puntos. En primer lugar, parte de una concepción de la vida tal como nosotros la conocemos. Es concebible, si bien no muy probable, que existan formas de vida extraterrestres basadas en procesos físicos muy diferentes. Es excesivamente chauvinista, especialmente al tratar de

temas tan fundamentales, considerar que la vida basada en la química del carbono es el único vehículo para la inteligencia y la tecnología.

Por otra parte, se pueden aducir argumentos fundamentales en favor de que ninguna clase de vida puede evolucionar hasta el punto de poseer inteligencia antes de que se hayan completado una serie de procesos físicos. La vida, según cualquier definición, supone un alto grado de complejidad y de orden que tiene ciertos prerrequisitos. Por ejemplo, la segunda ley de la termodinámica, que regula toda actividad natural, establece que antes de que aparezca cualquier clase de orden debe existir algún tipo de desequilibrio. Es posible que haya principios muy básicos que limiten el ritmo de acumulación de orden e información, y en consecuencia el ritmo de evolución de la vida, principios estos basados en las fuerzas existentes en la naturaleza.

Tal vez el punto más débil del argumento antrópico en la versión utilizada en el presente ejemplo tiene que ver con el límite superior de $t_{presente}$. Si bien es posible que la galaxia acabe convirtiéndose en inhóspita para la vida al agotarse las estrellas, no sería sorprendente que en los miles de millones de años que todavía han de transcurrir la tecnología avanzara lo suficiente como para superar este problema. Es fácil imaginar entornos artificiales aptos para la vida en un futuro suficientemente lejano. Dyson, que ha estudiado las posibilidades de supervivencia, cree que una comunidad con suficientes recursos podría alcanzar una longevidad ilimitada mediante una manipulación cuidadosa de su entorno. Para superar el inevitable agotamiento de las fuentes de energía libre y evitar verse inmersos en la famosa “muerte calorífica” del Cosmos asegurada por la segunda ley de la termodinámica, sería necesario que esa comunidad “hibernara” durante períodos de duración cada vez mayor. Pero la duración total de la vida de la comunidad podría ser infinita.

Si la vida puede continuar indefinidamente (dormida) en el futuro infinito, puede considerarse como sorprendente el hecho de que estemos percibiendo un Universo de edad finita. La coincidencia de los grandes números (**4.10**) tan sólo tendría un límite inferior: dado que $t_{presente}$ no tiene límite superior, la parte izquierda de la ecuación (**4.10**) solamente está limitada por el hecho de que t_* tiene que ser mayor que aproximadamente 10^{40}.

Esta limitación menos estricta solamente se aplica en el caso de un Universo en eterna expansión. Si la densidad del material cósmico es lo suficientemente grande, se producirá un nuevo desplome que pondrá fin a todo tipo de vida. El hecho de que nuestro $t_{presente}$ no sea demasiado más grande que t_* podría explicarse si pudiéramos demostrar que el tiempo de vida total del Universo no es mucho mayor que t_*. Esto podría ser así si los experimentos actuales sobre los neutrinos confirmasen la existencia de una masa en reposo diferente de cero (véase **apartado 3.1**). No obstante, es importante resaltar que no sabemos de ninguna razón fundamental por la cual el ciclo temporal de un Universo que volviera a desplomarse tuviera que estar relacionado con t_*. Si el tiempo de vida cósmico resulta ser $\sim 10t_*$, podemos considerarlo como puramente accidental: esta magnitud depende del ritmo inicial de expansión del Universo. Un análisis más detallado revelará probablemente que las galaxias estables y las estrellas solamente pueden formarse si ϱ es mayor que ϱ_{crit} precisamente en la cantidad necesaria para dar un tiempo de vida cósmico $\sim 10t_*$.

El papel central del elemento carbono en la vida terrestre llevó a Fred Hoyle a dirigir la atención a un nuevo y curioso accidente de la naturaleza. Los núcleos de carbono se sintetizan en las estrellas como resultado del encuentro casi simultáneo de tres núcleos de helio. Una colisión triple como ésta es bastante rara y sería completamente insignificante si no fuera por una propiedad accidental del núcleo de carbono. La unión de dos núcleos de helio forma un núcleo

inestable de berilio, ^{8}Be. La probabilidad de la posterior incorporación de un tercer núcleo de helio para formar carbono (^{12}C) antes de la desintegración del ^{8}Be depende en gran medida de la energía con que el núcleo de helio choca con el ^{8}Be, de breve existencia. La razón tiene que ver con las llamadas resonancias nucleares. Ocurre que cuando la frecuencia de la onda cuántica asociada al núcleo de helio incidente iguala una frecuencia interna de vibración del sistema compuesto, la sección eficaz nuclear de captura del tercer núcleo de helio aumenta extraordinariamente. Ahora bien, la energía térmica de los componentes nucleares de una estrella típica está en la situación de una resonancia en el ^{12}C. Este feliz accidente asegura la producción eficaz de carbono en el interior de las estrellas. Sin él, el ritmo de formación del carbono se vería muy reducido.

Pero esto no es todo; hace falta que el carbono recién sintetizado sobreviva a la posterior actividad nuclear en el interior de la estrella. El carbono podría agotarse al formar elementos más pesados. En particular, una nueva colisión con un núcleo de helio convertiría al ^{12}C en oxígeno ^{16}O. Pero de nuevo la naturaleza hace una elección afortunada. Una resonancia en el núcleo de ^{16}O está por debajo de la energía térmica de sus componentes, de manera que el ^{12}C permanece y no se transforma en oxígeno.

Los detalles de la estructura nuclear son inmensamente complicados, pero en último término la situación de las resonancias nucleares depende de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, en especial de la fuerza nuclear fuerte y de la fuerza electromagnética. Si las magnitudes de estas fuerzas no estuvieran elegidas cuidadosamente, la disposición fortuita de las resonancias en el ^{12}C y el ^{16}O no se habría producido y la vida, al menos su variedad terrestre, habría sido infinitamente menos probable.

Hablando de este tema en una publicación reciente, Hoyle considera que la coincidencia en la síntesis carbono–oxígeno es tan extraordinaria que parece un “montaje”. Al considerar el extraordinario ajuste de las resonancias nucleares hace el siguiente comentario: «Si

quisiéramos producir carbono y oxígeno en las mismas cantidades mediante la nucleosíntesis estelar, deberíamos establecer precisamente estos dos niveles y hacerlo de forma muy ajustada. Una interpretación razonable de los hechos es que una inteligencia superior ha jugado con la física, con la química y con la biología, y que no existen fuerzas ciegas en la naturaleza.»

5.3 LOS PRINCIPIOS. ANTRÓPICOS DÉBIL Y FUERTE

Si bien tanto Dicke como Hoyle utilizan el argumento del carbono en su discusión de las coincidencias naturales, existe una diferencia muy clara entre los dos argumentos tal como los hemos presentado en la sección anterior.

En el caso de los grandes números considerado por Dicke, nuestra existencia como compuestos carbónicos *explica* la presencia del número 10^{40} en dos contextos diferentes. La vida humana ha *seleccionado* una época, de entre todas las posibles, que necesariamente es del orden de t_*, y por lo tanto debe satisfacer la coincidencia de los grandes números (**4.10**).

Por otra parte, el ejemplo de Hoyle, tal como lo hemos expuesto, no explica la coincidencia de energías nucleares, sino que se limita a hacer un comentario sobre la extraordinaria fortuna de la circunstancia: si no hubiera sido así no estaríamos aquí para hablar de ello. Es una ilustración de lo afortunados que somos al existir en un Universo cuya estructura depende de forma tan delicada de las constantes de la naturaleza.

Carter denomina a la primera línea de razonamiento el principio antrópico *débil* y lo enuncia de la siguiente forma: «Aquello que es factible observar está delimitado por las condiciones necesarias para nuestra presencia como observadores.» En pocas palabras, los observadores delimitan lo observable. El principio débil no parece apli-

carse al ejemplo de Hoyle, ya que si bien nuestra presencia determina evidentemente la época presente, no puede tener ninguna influencia sobre la estructura de los núcleos.

Pero el ejemplo de Hoyle puede ajustarse al principio antrópico débil si admitimos la posibilidad de que las constantes fundamentales, como α y g_S, varíen con el espacio o con el tiempo. Ocurriría entonces que solamente aparecerían observadores en aquellas regiones del Universo donde, por casualidad, la disposición de resonancias nucleares fuera la adecuada. En realidad, Hoyle sugirió una posible variación de este tipo.

Se pueden hacer consideraciones parecidas respecto a la repulsión cosmológica que hemos discutido en el **apartado 4.5**. La extraordinaria pequeñez de Λ, debida al ajuste aparentemente milagroso entre Λ_q y Λ_{pura}, tiene una importancia evidente para los organismos vivos. Un ligero desajuste produciría un Universo que, o bien se desplomaría o bien explotaría catastróficamente, eliminando cualquier posibilidad de darse a conocer. De entrada, este hecho solamente parece confirmar nuestra fortuna de estar aquí. Pero si permitimos que Λ_q varíe, entonces la cancelación exacta con Λ_{pura} solamente ocurrirá en regiones relativamente limitadas del espacio. En estas regiones podrá surgir la vida, de manera que no es tan sorprendente que nos hallemos en una región del espacio-tiempo en la que $\Lambda \simeq 0$. El autor y Stephen Unwin han propuesto una posible razón por la cual Λ_q pueda variar a través del espacio.

Estas ideas se pueden extender a los demás ejemplos de coincidencias extraordinarias que hemos discutido en capítulos anteriores. Las variaciones de α y de g_S producirían mezclas variables de hidrógeno primitivo y de helio, las variaciones en las condiciones iniciales del *Big Bang* producirían algunas regiones del Universo con galaxias, mientras que otras no serían más que regiones difusas de gas o agujeros negros. Aquellas regiones que se hubieran expandido inicialmente con el ritmo adecuado serían estables durante un tiempo

suficiente para permitir la aparición de vida, mientras que otras regiones, deshabitadas, se hundirían o explotarían o contendrían grandes cantidades de anisotropía e inhomogeneidad. Y así sucesivamente.

La debilidad de estos argumentos estriba en que no hay indicios de tales variaciones en las condiciones iniciales o en las constantes fundamentales. Es posible establecer límites muy estrictos a la variación temporal de la mayor parte de las constantes de la **tabla 1**, mientras que las posibles variaciones en el espacio quedarían al descubierto en el comportamiento de las galaxias lejanas, todas ellas extraordinariamente parecidas a la nuestra. Solamente podrían pasar desapercibidas variaciones a escalas mucho mayores que el radio de Hubble.

Se ha propuesto otra forma de atacar las muchas y extraordinarias coincidencias que no pueden ser explicadas mediante el principio antrópico débil. Es el principio antrópico *fuerte,* que Carter define de la siguiente manera: «El Universo ha de ser tal que admita en su seno la creación de observadores en alguna de sus fases.»

Es evidente que el principio antrópico fuerte parte de bases filosóficas diferentes de las del principio débil. En realidad, representa un cambio radical respecto al concepto clásico de explicación científica. Afirma que el Universo está pensado para ser habitado y que tanto las leyes de la física como las condiciones iniciales están dispuestas de tal forma que quede asegurada la aparición de organismos vivos. En este sentido, el principio antrópico fuerte se asemeja a la tradicional explicación religiosa del mundo: Dios hizo el mundo para que fuera habitado por la humanidad.

El principio antrópico fuerte encuentra apoyo en la filosofía positivista, según la cual solamente es real aquello que es percibido. Desde esta perspectiva se puede argumentar que un Universo que no admita observadores no tiene sentido. El único Universo *real* es aquel que es percibido, de manera que este Universo debe ajustar sus

propiedades, por muy extraña que sea la disposición resultante, para permitir la aparición de seres conscientes.

Muchos científicos han expresado su acuerdo con el principio antrópico fuerte. Joseph Silk, al discutir la necesidad de la relación (**3.14**) en un Universo capaz de formar galaxias, dice: «La fragmentación e inestabilidad gravitatoria debe llevar desde los cúmulos gigantes a las galaxias, a las estrellas y en último término a los planetas y a un entorno adecuado para el desarrollo de la vida. Esta cadena continua es esencial en todo Universo cognoscible, y en consecuencia puede ser la clave para comprender el significado de los números fundamentales de la astrofísica y la cosmología.» Obsérvese que Silk afirma que es su cognoscibilidad lo que *explica* los números, y no al revés.

De manera análoga, Wheeler discute lo que él llama "nuestro Universo participativo", en el cual la existencia de un observador en una fase de su historia es en realidad responsable de la creación de ese tipo particular de Universo. Por ejemplo, cuando discute por qué es tan grande el Universo, escribe: «¿Qué valor tiene un Universo sin la conciencia de que existe?» Señala que si la distancia de nuestro horizonte no fuera $\gtrsim 10^9$ años luz, el Universo se desplomaría en un tiempo menor que t_*, lo cual haría imposible la vida. Wheeler concluye que el Universo es tan grande ($\gtrsim 10^9$ años luz) «porque sólo así el hombre puede estar aquí».

Barrow reafirma el principio de que nuestra existencia es en realidad *responsable* de la estructura tan especial del Universo: «Muchas observaciones del mundo natural, si bien pueden parecer *a priori* extraordinarias, son desde este punto de vista *consecuencias* inevitables de nuestra propia existencia» (la cursiva es mía).

Desde un punto de vista estrictamente físico, parece misterioso que la existencia de seres conscientes sea la causa de las famosas coincidencias. Es evidente que toda conexión causal directa es im-

posible. Es posible que el hombre sea producto de condiciones físicas muy especiales, pero difícilmente podemos atribuirle el establecimiento de sus propias necesidades ambientales.

Existe, no obstante, un área de la física en la cual el observador juega un papel central: la teoría cuántica. El proceso de medición en la física cuántica precisa de la participación de un observador consciente a un nivel fundamental. Si bien no se puede decir que el observador cuántico cree su propio universo, en el sentido convencional de “crear”, analizando la teoría de la medición cuántica se abre la puerta a una justificación física, no filosófica, del principio antrópico fuerte.

5.4 LA TEORÍA DE LOS MÚLTIPLES UNIVERSOS

El uso de palabras tales como “coincidencia”, “extraordinario” y “milagroso” en las discusiones sobre las relaciones especiales que hemos descrito en este libro, conlleva la implicación de *improbabilidad.* Pero la noción de probabilidad sólo tiene sentido si existe un conjunto de alternativas de entre las cuales se elige una.

Si un jugador de golf golpea al azar y mete la bola en el hoyo de un solo golpe, deberá admitir que ha tenido mucha suerte, ya que tal cosa es altamente improbable *a priori.* La improbabilidad proviene del hecho de que en un campo de golf hay muchas más posiciones que el simple hoyo, y que una bola golpeada aleatoriamente puede acabar indiferentemente en cualquiera de ellas. La estadística más rudimentaria nos dice que la probabilidad de que la bola caiga precisamente en el hoyo es remota. También podríamos decir que de un enorme número de golpes aleatorios sólo unos pocos acabarán con la bola en el hoyo. Se podría argumentar que cualquier posición final de la bola es igualmente improbable. Pero la cuestión es que el hoyo tiene un significado muy especial (al menos para los jugadores de golf), significado que no posee ningún otro punto del campo (por

eso la gente aplaude cuando el jugador consigue finalmente introducir la bola en el hoyo). De manera similar, la existencia de la vida tiene una significación muy especial para nosotros.

Podemos concebir una colección enorme de universos —un conjunto de mundos— cada uno de los cuales difiere ligeramente de los demás y de manera que toda combinación de valores de las constantes y toda disposición de condiciones iniciales se ejemplifica en alguno de ellos. En tal caso, las famosas coincidencias adquieren un significado más concreto. Imaginémonos al Creador eligiendo al azar uno de los universos de entre toda la enorme colección de posibilidades. Sabemos que la probabilidad de que elija un universo compatible con la vida es extraordinariamente pequeña.

Es difícil cuantificar la improbabilidad de la elección del mundo que percibimos, ya que si bien sabemos, por ejemplo, determinar las probabilidades relativas de obtener cara o cruz al tirar una moneda, no sabemos cómo hacerlo entre posibles universos. Pero si aceptamos el concepto de conjunto de mundos podemos afirmar que nuestro mundo es extremadamente improbable *a priori* y que somos muy afortunados por el hecho de existir, aunque no podamos medir *cuán* afortunados somos.

Es indudable que muchos creyentes considerarán que estas ideas apoyan su creencia en que el Creador no eligió aleatoriamente el mundo, sino que lo hizo con suma precisión y con el propósito de seleccionar un universo que *pudiera* ser habitado.

Los que prefieran una perspectiva y un lenguaje científicos pueden dirigirse a la teoría cuántica, con su estructura fundamentalmente probabilística. En principio, la teoría cuántica debería ofrecernos una medida de la probabilidad de los diferentes movimientos iniciales posibles del Universo, de manera que podríamos calcular la probabilidad del grado tan bajo de anisotropía actual dado un cierto estado cuántico del Universo.

Desgraciadamente, el concepto de estado cuántico del Universo es muy vago, incluso ambiguo, en la interpretación convencional (la

llamada de Copenhague) de la teoría cuántica. El problema fundamental es que un estado cuántico puede consistir en la superposición de varios mundos alternativos posibles. Al medir se selecciona, de manera aparentemente aleatoria, un mundo en particular: el real. La probabilidad de que la medición dé un resultado particular se puede calcular, pero en general es posible obtener cualquier resultado de entre un conjunto de ellos.

Es necesario investigar más detenidamente el acto mismo de la medición. Para medir un sistema necesitamos un aparato de medida que no es parte del sistema. El acto de medir consiste en acoplar temporalmente el aparato de medida al sistema y dejar que el sistema produzca un cambio observable en el aparato. Cuando el sistema es el Universo en su totalidad no tiene sentido la noción de aparato de medida externo. El Universo es todo cuanto existe. Por otra parte, si no hay nada con que medir el estado del Universo, ¿cómo puede éste realizar la transición de una multitud de mundos posibles a uno en concreto, el mundo *real*?

Este rompecabezas ha sido durante décadas un serio problema para las bases conceptuales de la teoría cuántica. Solamente se ha propuesto una solución, cuya idea básica consiste en aceptar la realidad simultánea de *todos* los posibles universos alternativos. Esta llamada interpretación de los múltiples universos de la teoría cuántica, propuesta por Hugh Everett en 1957, constituye un marco natural para el principio antrópico fuerte.

Antes de discutir la conexión antrópica, es conveniente considerar como ejemplo un sencillo experimento de dispersión. Supongamos que se lanza un electrón contra un protón. La onda cuántica asociada con el electrón se difracta en el protón y se dispersa como las ondas sonoras al chocar contra un objeto sólido. La onda proporciona una medida de la probabilidad de encontrar el electrón en un cierto lugar: allí donde la perturbación ondulatoria es mayor, es más probable que se encuentre el electrón.

La onda se dispersa a derecha e izquierda. Y, sin embargo, solamente existe *un* electrón. Dado que no se desintegra, el electrón solamente puede dispersarse o *bien* hacia la derecha o *bien* hacia la izquierda, con una cierta probabilidad. Un acto de medición nos revelará cuál es el caso; pero después de la medición la forma de la onda debe cambiar instantáneamente, ya que si el electrón está a la derecha ya no hay ninguna probabilidad de que esté a la izquierda. La onda que se mueve hacia la izquierda debe desaparecer súbitamente.

Esta repentina desaparición de la onda es la esencia de la paradoja de la medición cuántica, ya que si también describimos el aparato mediante una onda (como ha de ser si está sujeto también a los principios cuánticos) entonces aunque desaparezca la onda del electrón, la onda del aparato no lo hace —a menos que el aparato sea a su vez medido por otro, y así sucesivamente. Cuando se incluye a todo el Cosmos en esta descripción cuántica no queda nada capaz de hacer desaparecer la onda.

En la interpretación habitual de la teoría cuántica no se hace ningún intento de abordar cuestiones cosmológicas. Se considera que la medida de la posición del electrón proyecta al mundo bien en un estado en que el electrón se mueve hacia la derecha, bien en uno en que se mueve hacia la izquierda, pero no en ambos. El estado del aparato no se menciona.

Por el contrario, según la interpretación de Everett, en cada acto de medición el Universo se divide en dos; una parte contiene el electrón que se mueve hacia la derecha y la otra el electrón que se mueve hacia la izquierda. Los dos mundos poseen la misma realidad. Ambos coexisten pero, al menos a nivel macroscópico, no se interfieren. El observador consciente también se divide en dos, una copia en cada mundo.

Debemos suponer que cada átomo de cada galaxia está continuamente inmerso en este tipo de actividad de dispersión, y en conse-

cuencia que el mundo se va dividiendo en un número cada vez mayor de copias de sí mismo. Podemos comparar el Universo con un árbol que se ramifica una y otra vez. Las ramas cercanas difieren poco unas de otras, quizá tan sólo en la disposición de unos cuantos átomos. Pero entre todos los infinitos mundos paralelos habrá ejemplos de cada universo físico posible.

Este conjunto de mundos cuánticos contiene todas las posibles disposiciones iniciales de la materia, energía y movimiento. Podemos extender la idea y suponer que también se incluyen todos los posibles valores de las constantes fundamentales (si bien esto no formaba parte de la teoría original). Así adquiere realidad lo que era simplemente un instrumento conceptual para discutir la improbabilidad de nuestro Universo particular. De acuerdo con la teoría de Everett, nuestro Cosmos no es más que un ejemplar de la ilimitada variedad de universos que existen.

Si se acepta la interpretación de Everett de la teoría cuántica ya no se necesita el principio antrópico fuerte.

El principio débil es suficiente para explicar toda las coincidencias conocidas, ya que en el inmenso conjunto de universos coexistentes siempre habrá algunos (aunque en proporción muy pequeña) en los que los números y las condiciones sean los correctos. La vida solamente podrá aparecer y desarrollarse en estos universos. Sólo podrán ser observados aquellos que satisfagan las relaciones numéricas. No es, entonces, sorprendente que percibamos un universo con propiedades tan especiales, ya que nuestra propia existencia lo ha seleccionado de entre todo el conjunto, de la misma manera que hemos seleccionado la superficie de un planeta de entre la inmensa variedad de lugares cósmicos menos habitables.

De acuerdo con este punto de vista, las características tan especiales del Universo ya no son extraordinarias ni milagrosas, sino inevitables. Su aparente improbabilidad no es más que un reflejo de su naturaleza singular. La inmensa mayoría de universos no son

compatibles con la vida. Pero sólo los pocos que lo son pueden ser observados.

La teoría de Everett no es la única manera de infundir realidad al marco conceptual de un conjunto de mundos. Wheeler ha considerado la noción de un conjunto secuencial en el contexto de un modelo cosmológico de recontracción. Recordemos que un Universo tal se expande a partir de una condición inicial singular hasta alcanzar un volumen máximo, tras lo cual vuelve a comprimirse hasta destruirse por completo en una singularidad espaciotemporal final. Si se la toma en serio, la singularidad representa el derrumbamiento total de la física conocida. Wheeler explota esta oportunidad proponiendo que, de hecho, una cierta clase de Universo sobrevive a su encuentro con la singularidad, emergiendo "reprocesado", con nuevos valores para las constantes fundamentales, un nuevo modelo de movimiento e incluso nuevas leyes físicas.

El anterior universo en contracción "rebota" revitalizado en un nuevo ciclo de expansión y contracción, seguido de otro y de otro más y así *ad infinitum.* En cada ciclo la estructura del Universo es diferente. Si el reprocesado se produce de forma aleatoria, a la larga, por pura casualidad, los números y la organización acabarán dando origen a la feliz aparición de las relaciones numéricas. Estos ciclos permitirán la emergencia de cosmólogos que escribirán libros sobre el grado extraordinario de conspiración en la naturaleza que ha sido necesario para disponer las cosas en beneficio de los seres vivos.

En el marco conceptual de los múltiples universos, Barry Collins y Stephen Hawking se preguntaron: «¿Por qué es isótropo el Universo?» En el **apartado 4.3** vimos que un Universo anisótropo podría dar lugar a grandes cantidades de calor que impedirían la formación de galaxias al ejercer una fuerte presión de radiación. Es evidente que tal cosa no favorecería la vida tal como nosotros la conocemos. Collins y Hawking abordaron el tema desde un ángulo distinto. Demostraron que, en general, el Universo debía volverse más

anisótropo a medida que se iba expandiendo. Pero si el ritmo de expansión se ajusta de forma *exacta* a la intensidad gravitatoria, de manera que $k = 0$ (es decir, si se satisface la condición **4.14**) entonces seguirá siendo isótropo. Sólo en un Universo que cumpla aproximadamente que $k = 0$ se pueden formar galaxias estables: cuando k es apreciablemente menor que 0 el Universo vuelve a comprimirse con extrema rapidez. Collins y Hawking concluyen que solamente en un Universo con $k \simeq 0$, es decir, un Universo que pueda ser isótropo durante mucho tiempo, puede aparecer la vida. Entre el conjunto de universos coexistentes, la casi totalidad de los cuales no tienen $k \simeq 0$ y son muy anisótropos, hemos seleccionado un isótropo en el que las galaxias proporcionan las condiciones adecuadas para nuestra existencia. La respuesta de Barry Collins y Stephen Hawking a la pregunta «¿por qué el Universo es tan isótropo?» es: «Porque nosotros existimos.»

El concepto de conjunto de mundos se puede criticar desde diversos puntos de vista, unos filosóficos, otros físicos. Puede parecer poco atractivo que la naturaleza se permita una duplicación tan prolífica. ¿Somos realmente capaces de creer que hay un número ilimitado de universos creados, pero nunca observados, que no sirven otro propósito que asegurar que en alguno de ellos tendrá lugar el accidente cognoscitivo? Invocar un número infinito de universos inútiles para explicar las coincidencias parece que es llevar las cosas demasiado lejos. Pero es necesario admitir que las alternativas —un Universo creado deliberadamente para ser habitado, o un Universo cuya estructura tan especial es un puro milagro— también están sujetas al desafío filosófico.

También se ha criticado la disposición aleatoria del conjunto de mundos del principio antrópico desde puntos de vista físicos y matemáticos. El problema se remonta a una vieja idea de Ludwig Boltzmann según la cual el grado actual tan elevado de organización cósmica es el resultado de una fluctuación estadística extremadamente rara a partir de una condición mucho más probable de desorden

amorfo, y que la única razón de que tengamos el privilegio de asistir a este suceso extremadamente improbable es que nuestra propia existencia depende de condiciones que sólo esta extraordinaria fluctuación puede proporcionar. Es obvio que nos encontramos ante una formulación primitiva del principio antrópico débil.

La fluctuación a la que se refiere Boltzmann no es más que una versión cósmica de la clase de fluctuaciones responsables del movimiento browniano de las pequeñas partículas en suspensión en un fluido. Gracias al movimiento aleatorio de los átomos, la cooperación a gran escala de un gran número de átomos conspirará, después de un tiempo increíblemente largo, para producir de forma espontánea el orden a partir del caos —como el chimpancé que interpreta accidentalmente a Beethoven golpeando continuamente las teclas del piano. Un simple ejemplo es el de una caja con gas: si esperamos un tiempo suficiente, todas las moléculas del gas se concentrarán simultáneamente y por azar en uno de los extremos de la caja. La espera será enorme, pero todo es posible en un tiempo infinito.

Una característica fundamental del orden obtenido espontáneamente a partir de oscilaciones aleatorias es que es inmensamente más probable que se produzca una pequeña cantidad de orden que una mayor. Es muchísimo más probable que el chimpancé interprete los primeros compases de “Asturias patria querida” que una sonata entera. Por la misma razón, es muchísimo más probable que aparezca una fluctuación que origine una galaxia que otra que dé origen a miles de millones de ellas. Pero una galaxia es suficiente para producir observadores conscientes. Entonces ¿por qué seguimos encontrando orden en el Universo por lejos que miremos?

La misma crítica se puede dirigir contra el principio antrópico en lo que respecta al conjunto de mundos. Habrá muchísimos más universos en los que la situación sea favorable para la creación de una sola galaxia que universos multigalácticos. Por ello es mucho más probable que un observador típico se encuentre en un Cosmos de

una sola galaxia. En consecuencia, la omnipresencia de galaxias en *nuestro* Universo es un misterio.

Este reto al principio antrópico, lanzado por Roger Penrose, ignora la posibilidad de relaciones entre la estructura local y la global. Puede ser que, de hecho, haya una conexión entre la formación de galaxias y la estructura a gran escala del Cosmos. Una conexión de este tipo la proporciona el llamado principio de Mach, que atribuye el origen de la inercia a las interacciones con galaxias lejanas. Al comentar que el Universo parece demasiado “elaborado” para el simple propósito de la existencia de unos pocos individuos conscientes, R. Dicke y P. J. E. Peebles destacan el hecho de que el principio de Mach impide la existencia de un Cosmos de una sola galaxia.

Si combinamos la hipótesis del conjunto de mundos con el principio antrópico débil, podremos encontrar argumentos plausibles que fijan los valores de casi todos los parámetros fundamentales que, como vimos en el **capítulo 2**, determinan aproximadamente la estructura del mundo físico. Es posible que análisis más detallados puedan delimitar otras características tales como la dimensión del espacio y del tiempo, el número de quarks y leptones, el número de fuerzas fundamentales, y así sucesivamente.

Desde luego, tales argumentos no pueden sustituir a una teoría física apropiada. Es difícil imaginar, por ejemplo, cómo a partir del principio antrópico se pueden hacer predicciones contrastables, dado que, en cualquier caso, toda teoría física incompatible con nuestra existencia es claramente incorrecta. Además, a falta de todo conocimiento sobre la existencia de vida extraterrestre, no tenemos más que argumentos muy generales sobre los prerrequisitos físicos de la biología. Tal vez la vida puede surgir en condiciones mucho más amplias que las que hemos venido suponiendo.

Es posible que futuros avances nos proporcionen una explicación de las coincidencias numéricas estudiadas que se base en la física y no en la biología. El cociente entre las intensidades de las fuerzas, por ejemplo, podría ser deducido en una teoría de superunificación

de las GUTs con la gravedad. En tal caso, el misterioso 10^{40} sería obtenible por medios matemáticos. Lo mismo puede ocurrir con la homogeneidad y la isotropía del Universo. Procesos ocurridos en el todavía poco conocido Universo primitivo podrían ser responsables de que el movimiento cósmico tuviera un comportamiento inesperadamente simétrico.

Si estos futuros éxitos se hacen realidad y nos proporcionan razones físicas de la disposición aparentemente accidental del mundo, entonces el principio antrópico perderá su capacidad de explicación. Sin embargo, no dejará de ser extraordinario que la física básica haya sido organizada de manera tan propicia para la vida. Tanto si las leyes de la naturaleza determinan las coincidencias como si no, el hecho de que estas relaciones sean necesarias para nuestra existencia es indiscutiblemente uno de los descubrimientos más fascinantes de la ciencia moderna.

EL UNIVERSO ACCIDENTAL
PAUL DAVIES

¿Es nuestro Universo un accidente de la naturaleza? Este es el primer libro de divulgación científica que ahonda en la hipótesis estimulante de que la estructura del mundo físico obedece a unas características o propiedades matemáticas. Para ello, el autor va analizando la serie de accidentes, aparentemente «milagrosos», de la naturaleza que le han permitido desarrollar al Universo su conocida estructura, compuesta de átomos, estrellas, galaxias, ... y de vida. La conclusión a la que llega el autor es de que existe un efecto de selección biológica y cósmica. Esta tesis hará que el lector se sienta a la vez optimista e intranquilo al saber que su propia existencia puede formar parte del cumplimiento preciso de las leyes de la física.

Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres y catedrático de física teórica en la Universidad de Newcastle. Autor de artículos para publicaciones científicas y de libros como El Universo desbocado, Superfuerza, Dios y la nueva física, La frontera del infinito, En busca de las ondas de gravitación y Otros mundos, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.

